



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESINA DE ESPECIALIDAD

Título

**ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL EN ROTURA Y
CONDICIONES DE SEGURIDAD DE PANTALLAS EN
VOLADIZO Y ANCLADAS. COMPARACIÓN CON
MÉTODOS CLÁSICOS**

Autor

AGUSTÍN CUADRADO CABELLO

Tutores

**ALEJANDRO JOSA GARCÍA-TORNEL
SEBASTIÀ OLIVELLA PASTALLE**

Departamento

INGENIERÍA DEL TERRENO, CARTOGRÁFICA Y GEOFÍSICA

Especialidad

GEOTECNIA

Fecha

NOVIEMBRE 2010

Agradecimientos

Estas líneas son mi muestra de agradecimiento a todas aquellas personas que de un modo u otro han confiado en mí, algunos mostrándome su apoyo y su cariño a lo largo de todos estos años, otros desde mucho tiempo antes de empezar, y unos pocos, durante toda mi vida.

A mi madre por todo aquello que resulta imposible expresar sin dejarse nada: gracias por todo el amor recibido. A mis hermanos por toda su protección y cariño, por ser mis ejemplos y por ser como sois, en especial a Miriam por hacer suyos mis temores. Marcos, te deseo lo mejor en la hermana pequeña de esta carrera.

A Adán y Fernando por los grandes momentos vividos y la alegría de saber que tenemos que vivir muchos más. A Mercè por su transparencia y complicidad. Noa, espero verte crecer. A Carlitos y Rebe por los inolvidables años de Obras Públicas, los mejores de mi vida. A Sanchu, Toni, Jordi i Lluís por esas fantásticas horas de estudio en nuestra segunda casa y por el secreto de qué tomas Crout. A Xavi, Pablo, Víctor, Ana y otros muchos que me dejo pero que llevo conmigo a pesar de continuar por caminos distintos. Todos formáis parte de esto.

Por último agradecer a mis tutores de tesina, Alejandro Josa y Sebastià Olivella, su vocación docente e investigadora así como toda su atención y todas sus respuestas a cualquier hora y en cualquier momento.

ÍNDICE

Resumen.....	5
Abstract	6
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Objetivo de la tesina	7
1.3 Contenido de la tesina	8
2 ANTECEDENTES	9
2.1 Introducción y clasificación de las estructuras de contención	9
2.2 Pantallas.....	9
2.2.1 Tipología de pantallas	10
2.2.2 Acciones en pantallas	11
2.2.3 Empuje de tierras	12
2.3 Sobrecargas externas.....	17
2.3.1 Sobrecargas en el trasdós	17
2.3.2 Ángulo de la superficie de rotura	19
2.4 Métodos clásicos de cálculo de pantallas	19
2.4.1 Pantallas en voladizo	19
2.4.2 Pantallas ancladas a un nivel.....	23
3 EL PROGRAMA PLAXIS.....	29
3.1 Introducción.....	29
3.2 El programa de elementos finitos Plaxis	29
3.3 Modelización de pantallas	31
3.3.1 Geometría	31
3.3.2 Condiciones de contorno y cargas.....	34
3.3.3 Propiedades de los materiales.....	35
3.3.4 Generación de la malla y tensiones iniciales	39
3.4 Cálculo de una pantalla	40
3.4.1 Tipo de cálculo	42
3.4.2 Parámetros de control de cálculo.....	42
3.4.3 Pretensado de los anclajes	43
3.5 Resultados generados.....	44
3.5.1 Σ Mstage	44
3.5.2 Tensiones, deformaciones y desplazamientos	44

3.6	Post-proceso de los resultados	44
4	ANÁLISIS DE PANTALLAS EN VOLADIZO	49
4.1	Introducción.....	49
4.2	Metodología y casos analizados.....	49
4.3	Definición del factor de seguridad	50
4.3.1	Factor de seguridad en la longitud de clava, F_{CLAVA}	50
4.3.2	Factor de seguridad en los parámetros, $F_{PARÁMETROS}$	51
4.3.3	Factor de seguridad en los momentos, $F_{MOMENTOS}$	51
4.4	Resolución por métodos clásicos	51
4.5	Resolución con Plaxis	53
4.6	Análisis de los resultados	56
4.6.1	Estado de rotura.....	56
4.6.2	Análisis tensional	58
4.6.3	Cohesión	65
4.7	Factores de seguridad.....	67
4.7.1	Descomposición del Factor de Seguridad	67
4.7.2	Factores de seguridad obtenidos.....	69
5	ANÁLISIS DE PANTALLAS ANCLADAS A UN NIVEL	73
5.1	Introducción.....	73
5.2	Metodología y casos analizados.....	73
5.3	Definición del factor de seguridad	74
5.3.1	Factor de seguridad en la longitud de clava, F_{CLAVA}	75
5.3.2	Factor de seguridad en los parámetros, $F_{PARÁMETROS}$	75
5.3.3	Factor de seguridad en los momentos, $F_{MOMENTOS}$	76
5.4	Resolución por métodos clásicos	76
5.4.1	Dimensionamiento del anclaje	76
5.4.2	Resultados obtenidos.....	79
5.5	Resolución con Plaxis y estrategia de cálculo.....	79
5.6	Análisis de los resultados	80
5.6.1	Estado de rotura.....	81
5.6.2	Pantalla anclada al 100% del método clásico.....	82
5.6.3	Análisis de la fuerza de anclaje.....	94
5.6.4	Cohesión	102
5.7	Factores de seguridad.....	103
5.7.1	Descomposición del Factor de Seguridad	103
5.7.2	Factores de seguridad obtenidos.....	105
6	CONCLUSIONES.....	107
7	BIBLIOGRAFÍA.....	111
	ANEJO I : PANTALLAS EN VOLADIZO	113
	ANEJO II: PANTALLAS ANCLADAS A UN NIVEL.....	139
	ANEJO III: DIMENSIONAMIENTO DEL ANCLAJE	155

Resumen

Autor: Agustín Cuadrado Cabello

Tutores: Alejandro Josa García-Tornel; Sebastià Olivella Pastalle

Palabras clave: *pantallas, métodos analíticos, elementos finitos, factor de seguridad, fuerza de anclaje.*

El uso de métodos analíticos clásicos para el diseño de pantallas continúa siendo hoy día una herramienta habitual y extendida debido a su sencillez y fiabilidad. Las hipótesis adoptadas en los métodos clásicos junto con la ampliación de un 20% de la longitud de clava obtenida, favorece la estabilidad del conjunto pantalla-terreno, pero se desconoce cuánto se aleja la situación de rotura del verdadero estado tenso-deformacional que se produce.

Por otra parte, el desarrollo del método de los elementos finitos ha permitido integrar, en un mismo cálculo, las características particulares que rigen el comportamiento de los distintos materiales que intervienen en el problema. El resultado final es un estado tenso-deformacional más realista que compatibiliza la respuesta de los diferentes elementos, tales como pantalla, suelo y anclaje, que intervienen en el diseño de pantallas.

En consecuencia, el objetivo de esta tesina consiste en establecer una comparación entre el comportamiento de pantallas según la predicción que establecen los métodos clásicos frente a los resultados que ofrecen los elementos finitos, estableciendo un criterio que proporcione valores más realistas del factor de seguridad.

En primer lugar se ha hecho una revisión de los métodos clásicos de cálculo habituales en el diseño de pantallas empleados en la tesina, destacando no sólo la metodología de cálculo sino los conceptos y las hipótesis en que se basan. Seguidamente se hace un resumen del funcionamiento del programa comercial de elementos finitos Plaxis y la manera en que se ha modelado el problema de pantallas. A partir del análisis de los casos estudiados, pantallas en voladizo y pantallas ancladas a un nivel, se extraen las conclusiones que a continuación se resumen.

En pantallas en voladizo las principales diferencias se encuentran en el estado tensional, donde se observa la influencia del rango elástico de tensiones absorbido por la pantalla así como el efecto del confinamiento en relación al aumento del empuje pasivo. Los factores de seguridad obtenidos indican un aumento progresivo de su valor a medida que se compara con los elementos finitos y se tienen en cuenta parámetros como la cohesión. De este modo, en general se puede decir que los factores de seguridad se duplican si se compara los métodos clásicos con los elementos finitos, siendo, en el caso de considerar el efecto de la cohesión, hasta tres veces mayor.

En el caso de pantallas ancladas a un nivel el comportamiento se aleja respecto a los métodos clásicos debido a la existencia del anclaje. Se observa que la fuerza final del anclaje depende de la fuerza inicial aplicada durante la excavación y del momento en que se aplica, modificando el estado tenso-deformacional del terreno y su mecanismo de rotura, que responde a un proceso intermedio entre la hipótesis de soporte libre y soporte fijo. Los factores de seguridad obtenidos duplican los obtenidos exclusivamente por métodos clásicos mostrando que la aplicación de fuerzas de anclaje mayores no se traduce en cambios sobre el factor de seguridad con la misma proporción.

Abstract

Author: Agustín Cuadrado Cabello

Tutors: Alejandro Josa García-Tornel; Sebastià Olivella Pastalle

Key words: *sheet pile walls, analytical methods, finite elements, safety factor, anchorage strength.*

The usage of classic analytical methods for the design of sheet pile walls even today continues to be a common and extended tool due to its simplicity and reliability. The hypotheses adopted for the classic methods along with an extension of the 20% of the depth of penetration obtained, favors the stability of the combination sheet pile wall-soil, but what remains unknown is how far away the breakage situation gets from the stress-strain state that is produced.

On the other hand, the development of the method of finite elements has allowed to integrate in the same calculation, the particular features that rule the behavior of the different materials involved in the problem. The final result is a more realistic stress-strain state which lets the responses of the different elements be compatible, such as sheet pile wall, soil and anchorage involved in the design of the sheet pile walls.

As a result, the target of this minor thesis consists of setting a comparison between the behavior of the sheet pile walls according to the prediction that the classic methods establish, and the results given by the finite elements, setting a criterion that may provide more realistic values regarding the safety factor.

Firstly, a review of the classic methods of calculation was made, usually used in the design of sheet pile walls appearing in the minor thesis, highlighting not only the methodology of the calculation but other concepts and the hypotheses they are based on.

Next comes an outline of the operation of the commercial program of finite elements Plaxis and the way the sheet pile walls problem has been handled. From the analysis of the studied cases, cantilever sheet pile walls and one-level-anchored sheet pile walls, we obtain the conclusions that are summarized below.

In cantilever sheet pile walls the main differences are found in the stress state, where the influence of the elastic range of stresses absorbed by the sheet pile wall can be observed as well as the confinement effect linked to the increase of the passive force. The safety factors obtained indicate a gradual increase of its value as it is compared to the finite elements and parameters such as cohesion are taken into account. By this means, generally speaking, it can be stated that the safety factors double if the classic methods are compared to the finite elements, being in the case of considering the cohesion effect, as much as three times bigger.

In the case of the one-level-anchored sheet pile walls, the behavior moves away regarding classic methods because of the existence of the anchorage. It can be observed that the final force in the anchorage depends on the starting force applied during excavation and the moment it is applied, modifying the stress-strain state of the ground and its breakage mechanism, resulting from an intermediate process between the hypothesis of the loose base and fixed base. The safety factors obtained double the ones obtained exclusively by the classic methods showing that the application of bigger anchorage forces doesn't mean changes on the safety factor in the same proportion.

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La optimización del espacio disponible exige a muchas construcciones a situarse por debajo del nivel del terreno, generando cortes verticales en la masa de suelo que pueden alcanzar grandes profundidades cerca de calles y avenidas o zonas colindantes a otras construcciones.

En las obras de contención se aplica cada día con mayor frecuencia el concepto de pantallas, resultando ser imprescindible en suelos de poca consistencia o estabilidad, nivel freático elevado, etc., donde prima sobre todo la seguridad con la que ejecutar más tarde la excavación del terreno y mantener la estabilidad de todos los elementos situados cerca de la zona.

El crecimiento del uso de pantallas se debe fundamentalmente a dos factores:

- i. Mayor aprovechamiento del terreno, tanto en superficie como en profundidad, motivado por su elevado coste actual.
- ii. Avances tecnológicos para la fabricación de maquinaria específica de alto rendimiento y uso de pantallas en el desarrollo de nuevas soluciones.

A pesar de estos factores, los métodos de cálculo habitualmente utilizados en el diseño de pantallas no han cambiado con la misma rapidez, siendo muy habitual el empleo de métodos clásicos de cálculo analítico cuyo uso extendido viene propiciado por su sencillez y efectividad.

En los últimos años la capacidad de cálculo ha aumentado con la aparición de los ordenadores, permitiendo profundizar en los fenómenos físicos que se producen en muchos campos de la ingeniería, siendo, en este caso, objeto de estudio el terreno en presencia de pantallas.

1.2 Objetivo de la tesina

Los elementos finitos, de los que se hablará más adelante, ofrecen ventajas de cálculo y de visualización de resultados frente a los métodos clásicos. No obstante, los métodos clásicos aportan una sencillez difícilmente equiparable en relación a la fiabilidad que proporcionan.

Los métodos clásicos de cálculo de pantallas poseen simplificaciones y adoptan hipótesis que los alejan del verdadero comportamiento real. El uso de estas medidas simplificadoras aporta fiabilidad gracias a las hipótesis conservadoras que intervienen en el proceso de cálculo y que se reflejan en los factores de seguridad.

El análisis y estudio de estos factores de seguridad constituyen el objeto fundamental de la tesina ya que mientras se adoptan valores de los mismos que se sabe que funcionan, se desconoce cuánto se alejan de los valores reales.

El objetivo de la tesina es establecer una comparación entre el comportamiento de pantallas según la predicción que establecen los métodos clásicos frente a los resultados que ofrecen los métodos numéricos, estableciendo un criterio que se acerque a valores de factores de seguridad más realistas e interpretables.

El planteamiento para alcanzar este objetivo adopta la siguiente estructura:

- i. Resolución de casos planteados mediante la aplicación de métodos clásicos. Métodos “simplificado” y “completo” para pantallas en voladizo y métodos de “soporte libre” y “soporte fijo” para pantallas ancladas a un nivel.
- ii. Resolución mediante aplicación de elementos finitos a través del programa Plaxis.
- iii. Análisis de los resultados obtenidos en i y ii y obtención del factor de seguridad que los relaciona.

1.3 Contenido de la tesina

La tesina está dividida en seis capítulos con la siguiente estructura:

En el primer capítulo se hace una introducción general de pantallas y se describe el objetivo de la tesina: comparación de los factores seguridad entre métodos clásicos y numéricos.

En el segundo capítulo se presenta el estado del conocimiento, donde se describe la tipología de pantallas y los métodos de cálculo clásicos empleados habitualmente en su diseño.

El tercer capítulo aborda el funcionamiento del programa Plaxis y la modelización de pantallas llevada a cabo. Contiene una breve explicación de los elementos finitos y de cómo estos se aplican en Plaxis. Seguidamente se indica el funcionamiento del programa y las diferentes herramientas utilizadas para simular pantallas. También se incluye la explicación del programa adicional creado en lenguaje de programación “Visual Basic” a través de una “macro” en hoja de cálculo Excel para la manipulación de los resultados en tensiones obtenido de Plaxis.

En el cuarto capítulo se presenta el primer tipo de pantalla estudiado: pantallas en voladizo. Se describe la metodología de trabajo adoptada para alcanzar los resultados obtenidos, se relacionan con los métodos clásicos y se muestran los factores de seguridad calculados.

El quinto capítulo es análogo al cuarto pero con pantallas ancladas a un nivel. Se describen los cambios introducidos por la presencia de un anclaje y nuevamente se desarrolla la metodología de cálculo; resultados obtenidos; relación con métodos clásicos y factores de seguridad resultantes.

Por último, el capítulo sexto incluye las conclusiones e indica posibles vías para continuar ampliando, modificar o corregir, el trabajo contenido en la tesina.

2 ANTECEDENTES

2.1 Introducción y clasificación de las estructuras de contención

Una estructura de contención es un elemento estructural cuyo fin es contener los empujes de tierras para salvar un desnivel en el terreno que sería inevitable sin ella, como por ejemplo la construcción del sótano de un edificio o un aparcamiento.

Se define una pantalla como un tipo de estructura de contención flexible de tierras utilizado habitualmente en la construcción en el que primero se instala la estructura y después se excava el terreno.

La clasificación de las estructuras de contención viene determinada por dos grandes familias:

- a) Estructuras de contención rígidas: aquellas cuyos movimientos son de sólido rígido sin presentar movimientos en el interior de la estructura o si existen son prácticamente despreciables.
- b) Estructuras de contención flexibles: aquellas en las que se producen movimientos de sólido rígido y de flexión.

Los principales elementos de contención son los muros y las pantallas cuya principal diferencia consiste en el método constructivo: mientras las pantallas se construyen antes de realizar la excavación, los muros se ejecutan después de la excavación.

2.2 Pantallas

El objetivo de este apartado es resumir la información necesaria acerca de pantallas cuyo conocimiento es de utilidad para entender el contenido de la tesina. Se estructura el contenido en el siguiente orden: clasificación de los tipos de pantallas; acciones a tener en cuenta en el dimensionamiento de pantallas; conceptos sobre el empuje generado por las tierras; teorías sobre la distribución de los empujes y por último una explicación de los métodos clásicos de cálculo analítico para la resolución de pantallas.

La figura 2.1 muestra el esquema de una pantalla con la nomenclatura utilizada en donde se pueden identificar los siguientes elementos:

- Trasdós: lado de tierras a contener.
- Intradós: lado de tierras en el que se ha realizado la excavación. Contiene la zona donde profundiza la clava.
- h: alzado de la pantalla, parte vista equivalente a la profundidad de excavación.
- d: clava de la pantalla equivalente a la zona enterrada.
- w: profundidad del nivel freático en el trasdós respecto a la superficie del terreno.

- Anclajes: tirantes metálicos que contribuyen a la estabilidad de la pantalla mediante reducción de las acciones desestabilizadoras. Constan de dos partes, la longitud activa o de anclaje (bulbo) en la que se concentra la resistencia y la zona libre o neutra que hace de conexión en el terreno en rotura entre la zona activa y el punto de apoyo sobre la pantalla.

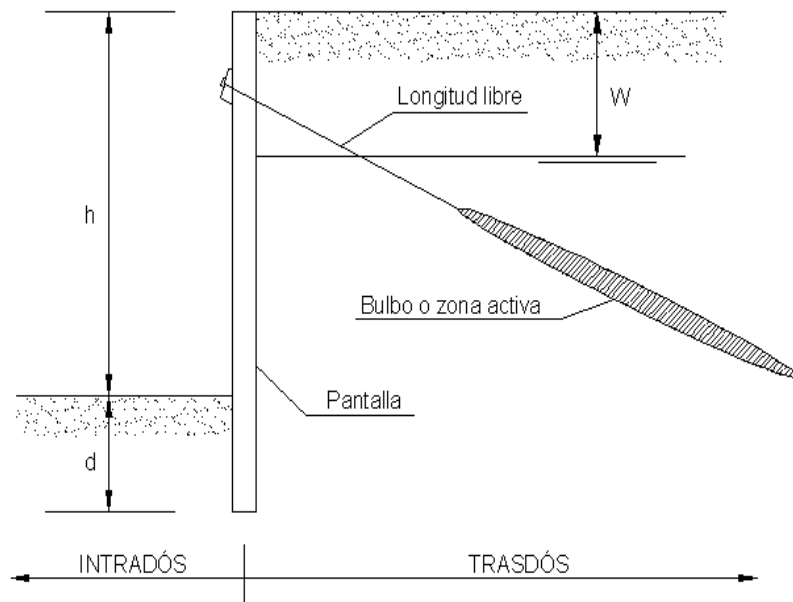


Fig. 2.1 Esquema general de una pantalla anclada a dos niveles

2.2.1 Tipología de pantallas

Una posible manera de clasificar las pantallas [1] es hacer referencia a las siguientes cuatro características:

- Según su material
 - Pantallas metálicas (tablestacas): perfiles metálicos prefabricados de poco espesor y sección conformada para aumentar la inercia.
 - Pantallas de hormigón armado o pretensado (ésta última menos usual).
 - Pantallas de bentonita y cemento: impermeabilización de taludes, para evitar erosión o pérdida de suelo.
- Según el proceso constructivo
 - Pantallas continuas (hormigonadas in situ).
 - Pantallas continuas prefabricadas (grandes paneles).
 - Pantallas discontinuas (formadas por pilotes) de elementos tangentes o separados.
- Según su forma de trabajo

- Pantallas en voladizo: sin soportes adicionales, la pantalla actúa como elemento autoportante.
- Pantallas ancladas en uno o varios niveles al terreno.
- Pantallas acodadas en el caso de entibaciones o de pantallas en sótano.
- Pantallas atirantadas en el caso de pantallas paralelas separadas por una porción de terreno.

iv. Según su función.

- Pantallas de contención de tierras (función principal).
- Pantallas de impermeabilización.
- Pantallas de cimentación de edificios.
- Pantallas combinación de las anteriores.

2.2.2 Acciones en pantallas

Los métodos clásicos de cálculo de pantallas se basan en el equilibrio de fuerzas generado por el conjunto de acciones que actúan sobre una pantalla, con el terreno en estado de rotura, para después aplicar el factor de seguridad. La acción que adquiere mayor importancia, tanto en distribución como en magnitud, es el empuje del terreno. No obstante para traducir estas acciones en valores actuantes sobre la pantalla, se puede acudir a diversas teorías que establecen mecanismos de cálculo diferentes para la obtención de la magnitud de las fuerzas y su distribución a lo largo de la pantalla, desde ábacos hasta ecuaciones.

En este apartado tan sólo se indican los principales métodos clásicos existentes utilizados en el desarrollo de la tesina: Coulomb y Rankine.

El total de acciones a considerar en el diseño de una pantalla se puede resumir en:

- Empujes activos de las tierras: cuando éstas se descomprimen horizontalmente.
- Empujes pasivos de las tierras: cuando se comprimen horizontalmente.
- Empujes horizontales debidos al nivel freático tanto en condiciones hidrostáticas como en flujo.
- Sobrecargas que generan empujes horizontales adicionales.
- Acciones instantáneas o alternantes.

En el proyecto de pantallas, una vez elegidas las acciones, se elige el tipo de pantalla en tanto si trabajará en voladizo o bien con la ayuda de anclajes (aunque una pantalla anclada puede requerir el cálculo como voladizo en alguna etapa del proceso constructivo). Los métodos de cálculo clásicos para cada caso se indican en apartados posteriores.

Con todo lo anterior se podrán determinar las tensiones que actúan sobre la pantalla y obtener así los diagramas de esfuerzos de los que se obtendrá una sección de la pantalla en función del material elegido para su ejecución, normalmente hormigón armado.

En la distribución de tensiones sobre la pantalla se debe manifestar el tipo de coacción exterior. La figura 2.2 puede resultar de ayuda para la comprensión de los métodos de cálculo clásicos relacionados con los empujes del terreno. Tal y como se observa, el empotramiento parcial de la clava reduce la carga del tirante y el momento máximo. Se

produce una descarga en las zonas de mayor movimiento (parte central del alzado) y una concentración de carga en las zonas más rígidas tales como el anclaje y la clava.

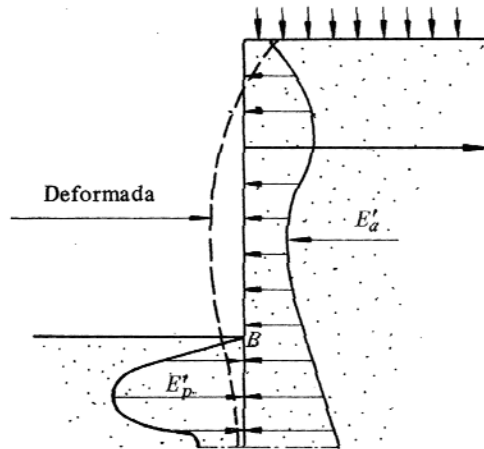


Fig. 2.2 Deformada de una pantalla anclada [2]

2.2.3 Empuje de tierras

El peso del terreno, la presencia de agua y todas las cargas adicionales que se encuentren dentro del campo de influencia sobre una estructura, generan una presión que es transmitida a través del terreno. El valor de esa tensión por unidad de superficie constituye el empuje de tierras. La magnitud de este empuje así como su distribución a lo largo de la estructura depende de las propiedades del terreno, la interacción en la interfase estructura-terreno y las deformaciones acopladas entre ambos medios.

De este modo, se definen dos estados principales de rotura del terreno llamados *estado límite activo* y *estado límite pasivo*, correspondientes a la teoría de Rankine, donde cada uno de ellos influye en el empuje producido sobre la estructura.

Supongamos un terreno horizontal (figura 2.3.a). La tensión efectiva horizontal aumenta linealmente con la profundidad (en ausencia de cargas externas) y la relación que mantiene con la tensión efectiva vertical es el coeficiente K_0 de empuje al reposo. Supongamos ahora que introducimos una pantalla en el terreno y luego se excava la zona de tierras del intradós. El empuje de tierras sobre la pantalla genera un desplazamiento en el que la relación entre las tensiones verticales y horizontales puede ser de dos formas:

- K_a (coeficiente de empuje activo): la pantalla introducida en el terreno cede desplazándose hacia la excavación. Las tierras de la zona de trasdós se deforman produciendo una variación de los esfuerzos cortantes sobre la estructura. Si la pantalla se sigue moviendo el terreno acabará por romperse, formándose una cuña de empuje (figura 2.3.b). A partir de ese momento el suelo entra en régimen plástico generando un empuje final distinto al empuje en reposo. Su valor es menor que K_0 y podemos decir que el terreno se ha descomprimido horizontalmente.
- K_p (coeficiente de empuje pasivo): mayor que K_0 . Contrario al caso anterior, si forzamos a que la pantalla se mueva contra las tierras se formará una cuña de

resistencia que será impulsada hacia arriba si la fuerza actuante es muy elevada (figura 2.3.c). Se dice que el terreno se ha comprimido horizontalmente.

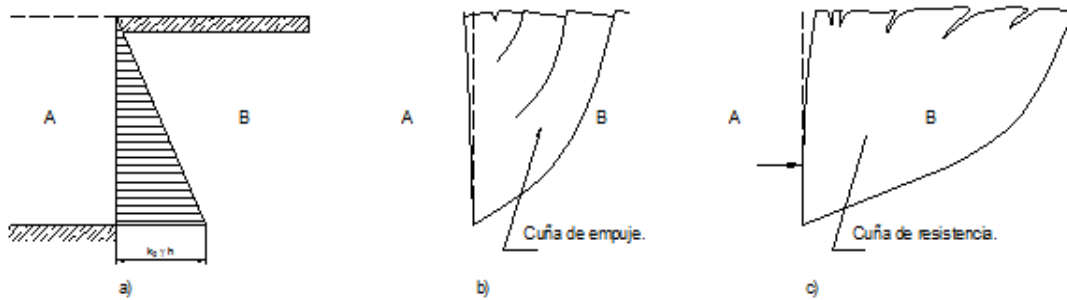


Figura 2.3 Definición de los coeficientes de empuje. (a) Empuje al reposo. (b) Estado límite, empuje activo. (c) Estado límite, empuje pasivo.[2]

En consecuencia se deduce que el empuje sobre la pantalla depende fundamentalmente de la deformación (figura 2.4) y que de todos los valores posibles del coeficiente de empuje solamente K_a y K_p corresponden a estados límite en rotura.

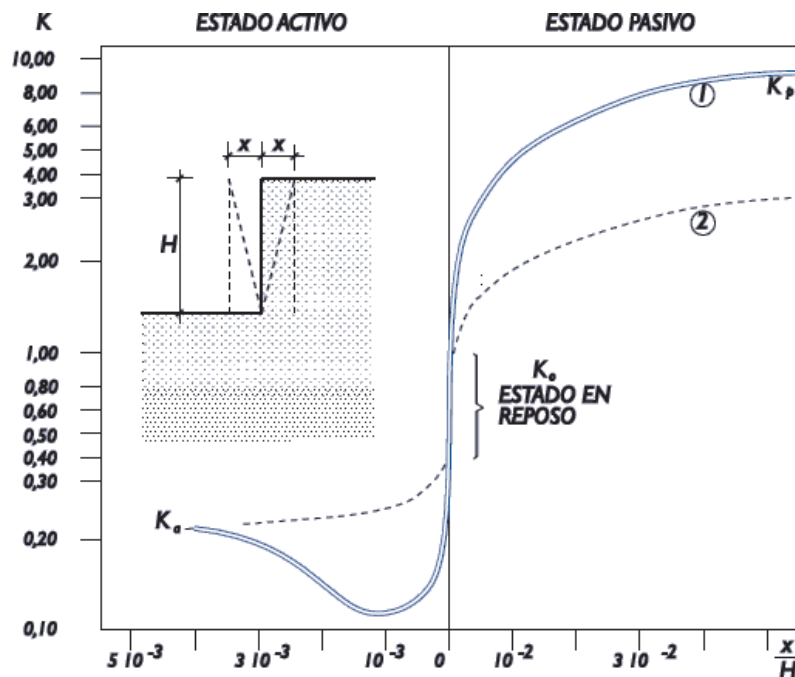


Fig. 2.4 Esquema de relación entre empuje y movimiento para terreno granular denso (1) y granula suelto (2). La parte inferior de la curva 1 está relacionada con fenómenos de resistencia de pico para este tipo de suelos [3]

Otros valores orientativos sobre la relación de rotación se muestran en la tabla 2.1.

Un estado de Rankine se puede definir como el estado tensional correspondiente a una zona plastificada en la cual existen dos familias de líneas características. Esto quiere decir que existen puntos del terreno que han alcanzado la rotura según el criterio de Mohr-Coulomb (figura 2.5) definiendo la trayectoria y el ángulo de las líneas por las que rompe la masa de suelo para el estado activo (figura 2.6.a) y para el estado pasivo (figura 2.6.b).

Tabla 2.1 Valores orientativos de desplazamiento en coronación de pantalla según el tipo de suelo y de empuje [3]

Tipo de terreno	Rotación x/H	
	E. Activo	E. Pasivo
Granular denso	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-2}$
Granular suelto	$4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-2}$
Cohesivo duro	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$
Cohesivo blando	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$

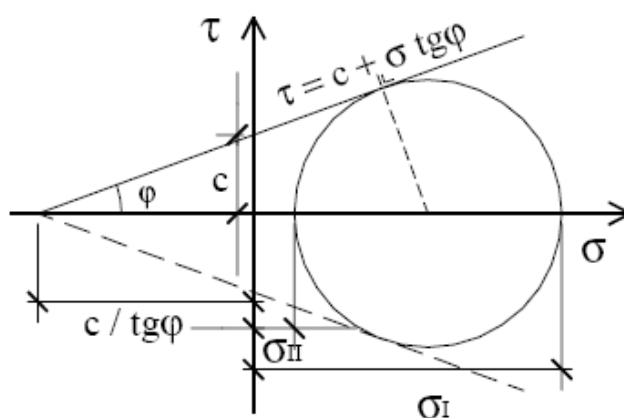


Figura 2.5 Círculo de Mohr en rotura a partir del cual se establecen las líneas características desde el polo para cada tipo de terreno.

La línea que une el polo del círculo de Mohr con el punto de tangencia sobre la recta de rotura define las direcciones de las líneas de rotura de la cuña del terreno (figura 2.6).

Una vez alcanzado el estado de rotura, ya sea por empuje activo o por empuje pasivo, la tensión efectiva que actúa en cada punto del terreno a una profundidad z , por debajo de la superficie y para terreno horizontal es:

$$\sigma_H = \sigma_v K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (\text{caso activo}) \quad (\text{ec. 2.1})$$

$$\sigma_H = \sigma_v K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (\text{caso pasivo}) \quad (\text{ec. 2.2})$$

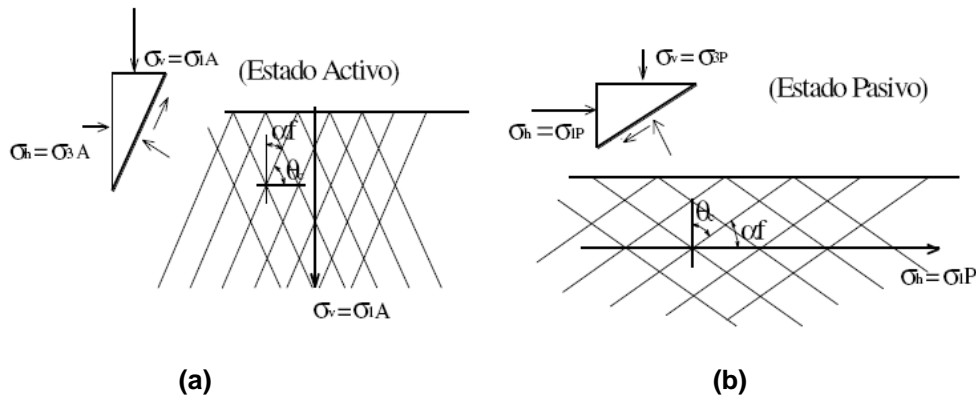


Figura 2.6 Líneas características de rotura para terreno homogéneo, sin cohesión y superficie horizontal. (a) Estado activo. (b) Estado pasivo [1]

Los coeficientes K_a y K_p son función del ángulo de rozamiento interno (ϕ), que para el caso de trasdós vertical con superficie horizontal y terreno homogéneo valen:

$$K_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{ec. 2.3})$$

$$K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{ec. 2.4})$$

La teoría de Rankine ha sido muy utilizada para el cálculo de empujes de tierras sobre muros y pantallas suponiendo que se dan las condiciones necesarias para que un macizo de suelo finito pueda encontrarse en este estado. Pero realmente no es fácil encontrar ventajas de la teoría de Rankine sobre otras como por ejemplo la de Coulomb, anterior a Rankine y que a continuación se detalla, para el cálculo de empujes de tierras. Se puede decir que la elegancia conceptual de Rankine se pierde en las simplificaciones que de su uso se hace.

Coulomb desarrolló en 1773 un estudio de empujes de suelo que, aún ahora, se sigue utilizando sobre todo para empuje activo ya que en el empuje pasivo se obtiene demasiado error (es usual en este caso el uso de ábacos o reducciones de dicho empuje ya que no es aconsejable utilizar la teoría de Rankine ni Coulomb por no adaptarse a la realidad). Se basa en el estudio del equilibrio límite de la cuña de rotura de suelo que se genera en el trasdós del muro (figura 2.7).

Las hipótesis de su teoría son:

- La cuña de empuje está limitada por una superficie de deslizamiento plana (considera plana la superficie en la que se produce el deslizamiento; de ahí que no sea apropiada en el caso pasivo donde se observa que la rotura es de tendencia curva).
- El suelo es isótropo, homogéneo, con rozamiento interno y en el plano de rotura se cumple la condición de rotura de Mohr-Coulomb (ec. 2.5):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{ec. 2.5})$$

En el estudio inicial se supone que el suelo está desprovisto de cohesión, y el empuje se calcula para el instante en que se está produciendo el deslizamiento de la cuña (se han movilizadas todas las fuerzas de rozamiento). Considera que

existe interacción muro-terreno lo cual favorece la estabilidad. De los posibles planos de deslizamiento considera como verdadero el que da, según cálculo, el valor de empuje activo máximo y el empuje pasivo mínimo.

- c) Se determina la magnitud del empuje por equilibrio de fuerzas mediante equilibrio de los vectores que intervienen en la rotura. La dirección del empuje depende del ángulo δ escogido.
- d) El punto de aplicación se halla como centro de masas del conjunto de empujes unitarios en elementos del trasdós. Coulomb supuso que todo punto del paramento interno del muro representa el punto de partida de una superficie potencial de deslizamiento.

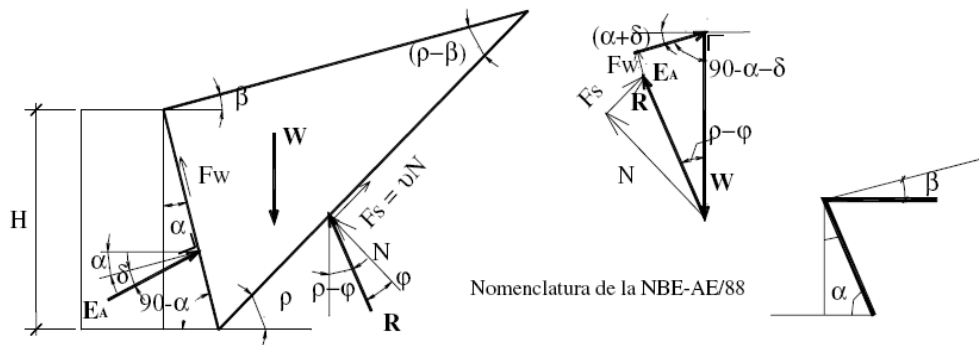


Figura 2.7 Cuña de equilibrio límite de Coulomb [1]

Aplicando la teoría de Coulomb, en NBE-AE/88 [4] vienen tabulados los valores de los coeficientes de empuje activo horizontal según Müller-Breslau [5] (ec. 2.6) y vertical para trasdós inclinado, superficie libre en talud inclinada y rozamiento estructura-terreno según el esquema de la figura 2.8. El valor del empuje activo horizontal es el responsable del vuelco.

$$K_{ah} = \frac{\sin^2(\phi + \alpha)}{\sin^2 \alpha \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (\text{ec. 2.6})$$

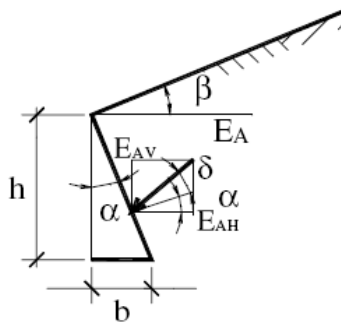


Figura 2.8 Esquema de los parámetros de K_a [4]

Donde:

- δ es el ángulo de rozamiento entre el terreno y la perpendicular al trasdós.
- α es el ángulo de inclinación de la pantalla respecto la vertical (positivo si la pared se inclina hacia el terreno).
- β es el ángulo de inclinación del terreno desde la horizontal (positivo en sentido antihorario).

En particular ambas teorías, Coulomb y Rankine, llevan a los mismos resultados para trasdós vertical, $\alpha = 0$, superficie del terreno horizontal, $\beta = 0$, y ángulo de rozamiento tierra muro $\delta = 0$. En este caso los coeficientes de empuje activo y pasivo coinciden con las ecuaciones 2.3 y 2.4. y proporcionan directamente la componente horizontal del empuje debido a las condiciones impuestas.

2.3 Sobrecargas externas

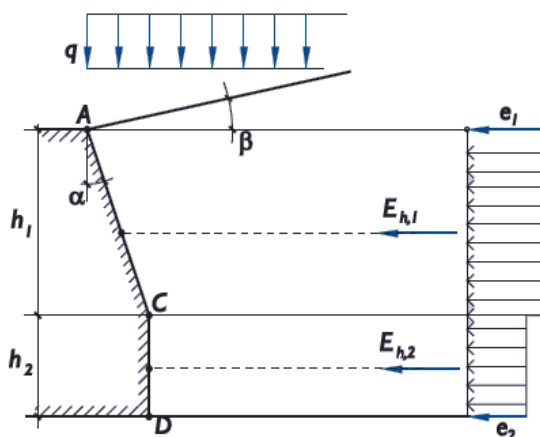
En los siguientes apartados se tratan los diferentes empujes adicionales que aparecen, en general, sobre el trasdós y el intradós de la pantalla. Los efectos que producen las sobrecargas que actúan en el trasdós de la pantalla se pueden calcular a partir de las aproximaciones que se muestran a continuación.

2.3.1 Sobrecargas en el trasdós

Todas las figuras mostradas en este apartado se han obtenido de la ROM 0.5-05 [3].

Sobrecarga uniformemente repartida

Se trata de la sobrecarga más simple y su intensidad se define como la carga total que actúa por cada metro cuadrado de proyección en planta. El efecto puede considerarse equivalente al que produce un empuje unitario adicional sobre el trasdós del muro como el indicado en la figura 2.9.



EMPUJES UNITARIOS:

$$e_1 = (K_{ah})_1 \cdot \frac{\cos^2 \alpha \cos \beta}{\cos(\beta - \alpha)} \cdot q$$

$$e_2 = (K_{ah})_2 \cdot q$$

EMPUJES POR TRAMOS:

$$E_{h1} = e_1 \cdot \frac{h_1}{\cos \alpha}$$

$$E_{h2} = e_2 \cdot h_2$$

Figura 2.9 Efecto de una sobre carga uniforme en el empuje activo horizontal [3]

Efecto de sobrecargas parciales sobre el empuje activo horizontal

En la figura 2.10 se muestran ejemplos de diferentes tipos de cargas parciales actuando sobre el trasdós de una pantalla así como posibles formas de calcular el empuje.

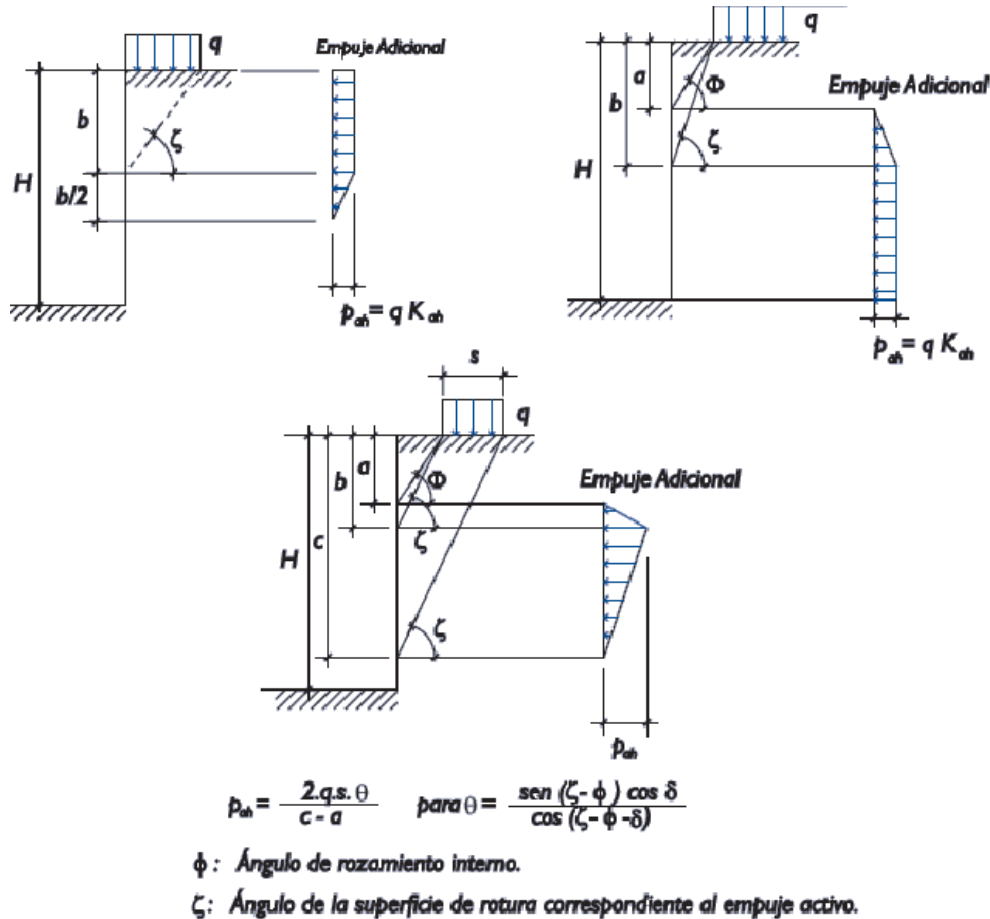


Figura 2.10 Efecto de sobrecargas parciales en el empuje activo horizontal [3]

Donde según la nomenclatura utilizada por la ROM 0.5-05:

- θ es el ángulo de rozamiento interno.
- ζ es el ángulo de la superficie de rotura correspondiente al empuje activo (Ver apartado 2.3.2)

Otras sobrecargas

Otros tipos de sobrecarga tales como lineales, concentradas, de cimentación, horizontales, etc., pueden consultarse en bibliografía diversa donde se proponen ejemplos de soluciones para la obtención de empujes [3][4][6].

2.3.2 Ángulo de la superficie de rotura

Algunos ejemplos de los empujes que generan las sobrecargas en el trasdós se han mostrado en el apartado anterior 2.3.1. En muchos de ellos es necesario utilizar el ángulo de la línea de rotura, cuya expresión ya simplificada para trasdós plano y superficie horizontal, a partir de la teoría de Coulomb, se obtiene [3]:

$$\tan \zeta = \tan \phi + \frac{1}{\cos \phi} \sqrt{\frac{\sin \phi \cos \delta}{\sin(\phi + \delta)}} \quad (\text{ec. 2.7.a})$$

En el caso que la dirección del empuje coincidiese con la normal al trasdós, hecho que se consigue para $\delta = 0$, el ángulo de la línea de rotura coincide con el obtenido con la teoría de Rankine.

$$\zeta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \quad (\text{ec. 2.7.b})$$

2.4 Métodos clásicos de cálculo de pantallas

En este apartado se describen los métodos de cálculo clásicos más habituales en casos simples para pantallas en voladizo y con un anclaje.

2.4.1 Pantallas en voladizo

Consideremos una pantalla en voladizo como la que se muestra en la figura 2.11.

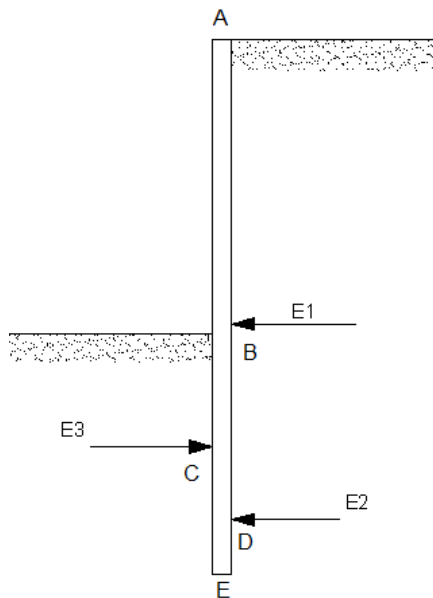


Figura 2.11 Esquema de empujes en pantalla en voladizo

Desde el punto A hasta el fondo de la excavación sólo habrá fuerzas en un sentido, ya que el terreno sólo empuja desde un lado. La resultante de los empujes en esta zona ha sido representada, en la figura 2.11, por E1.

Para equilibrar la fuerza E1 se necesitan al menos dos fuerzas más de sentidos opuestos, E2 y E3, situadas por debajo de la altura de excavación. El módulo de la fuerza E2 es mayor que el de la fuerza E3, ya que por equilibrio de fuerzas horizontales se puede ver que $E2 = E1 + E3$. Para poder tener estos empujes de signo contrario por debajo de la altura de excavación, los corrimientos del terreno en dicha zona y por tanto los empujes del terreno, deberán tener sentidos y valores apreciablemente diferentes.

Como E2 es mayor que E3 y de signo contrario, las deformaciones producidas en el terreno por la pantalla tenderán a ser más elevadas en la zona superior del intradós.

Si la profundidad de empotramiento fuese pequeña, la distancia entre los puntos de aplicación de estas fuerzas, C y D, sería muy reducida, y si el movimiento del punto C tiene que ser mayor que el del punto D, conducirá a un giro muy elevado, con el consiguiente desplazamiento en la zona superior de la pantalla. Para evitar que estos desplazamientos sean mayores a los deseados existen dos opciones: aumentar la longitud de clava o colocar un anclaje.

Como se ha comprobado, las pantallas en voladizo necesitan tres fuerzas para poder alcanzar el equilibrio y su tendencia es girar alrededor de un punto que está situado entre C y D. Por lo tanto, la longitud de clava, principal incógnita de este tipo de pantalla, proporciona la longitud necesaria para poder establecer el equilibrio de momentos.

Método de cálculo completo

El método de cálculo completo se basa en reproducir una distribución de empujes que permita la generación de las tres fuerzas necesarias para el equilibrio. Dicha distribución se muestra de manera idealizada en la figura 2.12.

Las incógnitas a resolver son la profundidad de clava, d , y la cota z del punto de giro de la pantalla. Para su resolución se aplica un método iterativo basado en los siguientes pasos:

- i. Estimar un valor aproximado de clava, d , según el tipo de terreno.
- ii. Calcular los empujes activo y pasivo.
- iii. Establecer el equilibrio de fuerzas horizontales ($\sum F_h = 0$), de donde obtenemos el valor de z . En el caso de considerar una sola capa de terreno y la ausencia de nivel freático y sobrecargas, se obtiene la siguiente ecuación:

$$z = \frac{d^2 \cdot K_{ph} - (h + d)^2 \cdot K_{ah}}{(2d + h)(K_{ph} - K_{ah})} \quad (\text{ec. 2.8})$$

- iv. Con el valor de z obtenido, se comprueba el equilibrio de momentos respecto al punto de giro, $\sum M = 0$. Si no se verifica el equilibrio de momentos, se define un nuevo valor de d y se vuelve al paso ii.

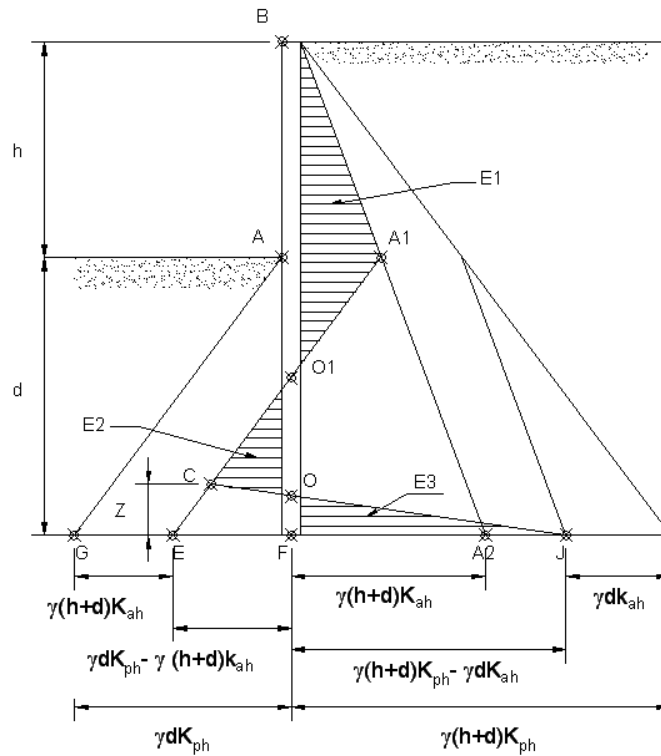


Figura 2.12 Método completo: distribución de empujes y leyes resultantes

Método de cálculo simplificado

Con el objetivo de simplificar las ecuaciones que se obtienen en el método completo, se ideó el método de cálculo simplificado. Este método sustituye los empujes que se generan por debajo del punto de giro de la pantalla por una fuerza equivalente, representada en la figura 2.13 por R .

Con este método solo hay una incógnita a resolver, que es la profundidad de clava, d . Para encontrar este valor se busca el valor de la longitud de clava que da equilibrio de momentos respecto al pie de la pantalla. Como ya se ha comentado, de esta manera la fuerza R , también llamada contraempuje, no interviene en las ecuaciones.

Debido a esta simplificación, el valor de d que se obtiene con este método es menor que con el método completo para que se pueda desarrollar la zona pasiva del trasdós. Por este motivo y para garantizar que la longitud de clava es lo suficientemente grande como para permitir que se movilice el empuje pasivo en el trasdós del muro, se aplica un incremento de la longitud de clava de un 20%.

Para el caso de terreno granular seco y sin sobrecargas el valor de la longitud de clava se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$d = h \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{K_{ph}}{K_{ah}} - 1}} \quad (\text{ec. 2.9})$$

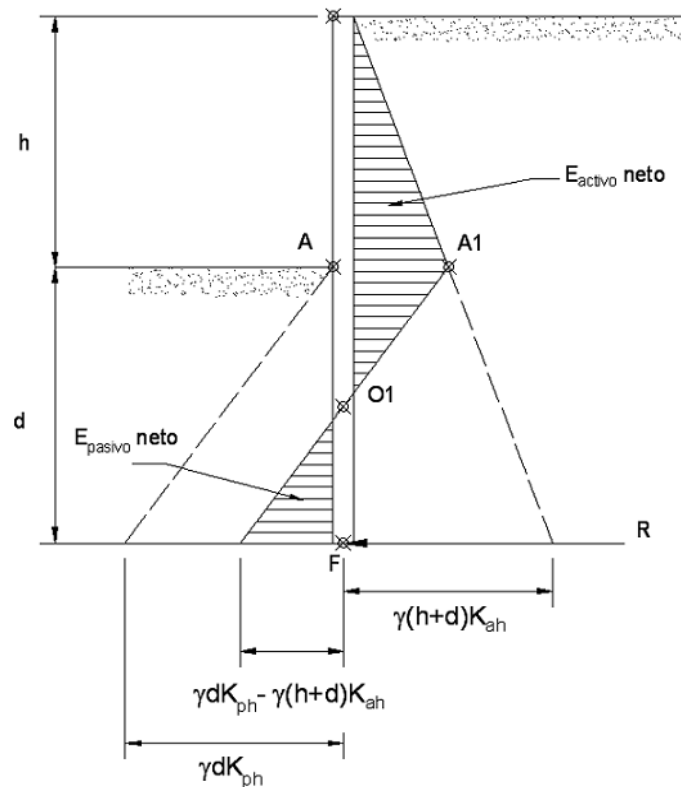


Figura 2.13 Método simplificado: distribución de empujes y leyes resultantes

La formulación mostrada en este apartado corresponde a los casos más simples. En el caso de presentarse un caso más complejo la metodología de cálculo es la misma, salvo que las distribuciones de empujes serán más complejas.

Pantalla en voladizo y suelo cohesivo

A continuación se va a tratar de manera independiente el caso de pantallas en voladizo en medio cohesivo, ya que introduce variaciones en el cálculo que deben tenerse en cuenta.

Si el suelo está saturado y el proceso se da en un corto espacio de tiempo no se puede disipar la presión de agua, por lo que se trabaja con tensiones totales. Una hipótesis utilizada habitualmente consiste en sustituir la cohesión por la resistencia al corte sin drenaje (c_u) y suponer el ángulo de rozamiento interno nulo. En estas condiciones se verifica que $K_a = K_p = 1$ y los diagramas de presiones activas y pasivas tienen la misma pendiente. La distribución de tensiones sobre la pantalla para medios cohesivos se simplifica obteniéndose las siguientes expresiones:

$$\sigma_H = \sigma_V - 2c_u \quad (\text{caso activo}) \quad (\text{ec. 2.10})$$

$$\sigma_H = \sigma_V + 2c_u \quad (\text{caso pasivo}) \quad (\text{ec. 2.11})$$

El análisis de la distribución de empujes sobre la pantalla muestra que en la zona de la pantalla comprendida entre la coronación y el fondo de excavación aparecen empujes negativos (figura 2.14) en el caso de no existir cargas o de que estas sean bajas. Este efecto define una altura de excavación (ec. 2.12) a partir de la cual aparecen empujes activos.

$$h_c = \frac{2c_u}{\gamma} \quad (\text{ec. 2.12})$$

Por otro lado, si $h < \frac{4c_u}{\gamma}$, todo el empuje del terreno sobre la pantalla se situaría a un único lado (desaparecerían los empujes en la zona de clava del intradós indicados en la figura 2.14) y toda la pantalla recibiría empujes de igual sentido, por lo que estrictamente la pantalla nunca sería estable. Esta situación sólo puede ser teórica ya que no existen terrenos cuya resistencia al corte sin drenaje sea constante con la profundidad, sino que aumenta con el confinamiento y en consecuencia siempre existirán empujes en dicha zona como los indicados en la figura 2.14.

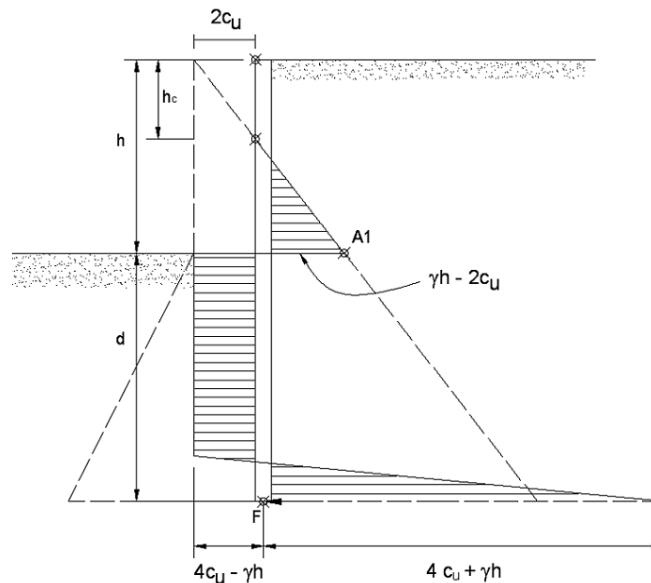


Figura 2.14 Distribución de tensiones de pantalla en voladizo en medio cohesivo, homogéneo y sin cargas exteriores

2.4.2 Pantallas ancladas a un nivel.

Las pantallas con un anclaje se caracterizan por poder alcanzar el equilibrio considerando fuerzas netas en un sólo sentido en la zona enterrada de la pantalla. (figura 2.15)

E1 representa la fuerza del anclaje necesaria para obtener el equilibrio, E2 la resultante del empuje de tierras en el trasdós de la pantalla y E3 la resultante del empuje en el intradós de la pantalla. Con estas tres fuerzas es posible alcanzar el equilibrio de la pantalla. No obstante, se debe recordar que una pantalla está anclada una vez se ha colocado el anclaje y hasta ese momento la estructura se comporta como una pantalla en voladizo.

En este caso, a diferencia de las pantallas en voladizo, en la zona correspondiente a la clava sólo hay fuerzas netas en un sentido. Además, el módulo de la fuerza E3 es menor que en el caso anterior ya que ahora $E3 = E2 - E1$.

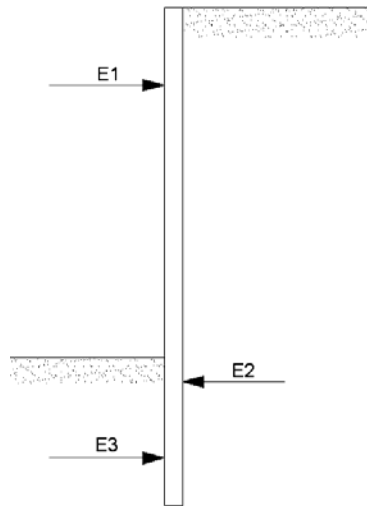


Figura 2.15 Esquema de empujes en pantalla anclada

Se van a presentar dos métodos habituales de cálculo para la resolución de pantallas ancladas en un nivel. El primer método es “el método de soporte libre” y el segundo “el método de soporte fijo” donde la principal diferencia entre ambos consiste en las hipótesis de cálculo adoptadas.

Aplicando el método de soporte libre se obtiene la longitud de clava mínima que garantiza el equilibrio estricto de la pantalla. Por el contrario, si se aplica el método de soporte fijo se obtiene la longitud de clava máxima, a partir de la cual añadir más clava resulta innecesario.

Respecto a los momentos máximos obtenidos sobre la pantalla, el método de soporte libre da momentos máximos mayores que el método de soporte fijo.

El aumento de la longitud de clava influye en los desplazamientos que sufre la pantalla y los corrimientos del terreno, como se puede ver en la figura 2.16. A medida que aumenta la longitud de clava disminuye la flecha de la pantalla en superficie. La elección del método de cálculo a aplicar dependerá de todas estas variables, el momento máximo, la longitud de clava y la deformabilidad de la estructura y el terreno.

Entre los dos valores de longitud de clava que aportan los dos métodos, cualquier longitud de clava es válida ya que la estructura sería estable aunque el momento de cálculo cambia.

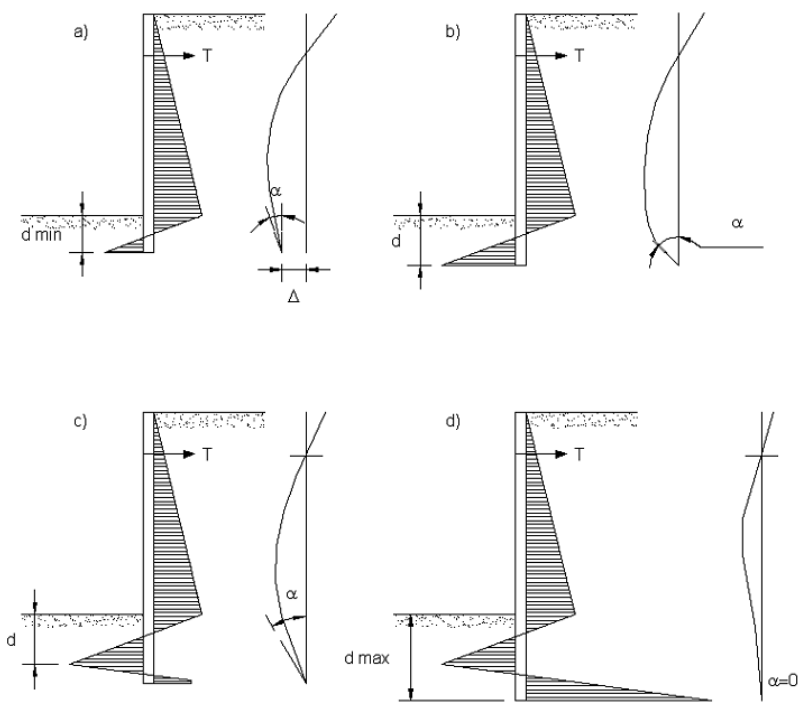


Figura 2.16 Efecto de la profundidad de clava en la distribución de empujes y en la deformada

A continuación se introducen los dos métodos de cálculo así como sus aplicaciones numéricas.

Método del soporte libre

Este método se basa en suponer que las deformaciones de la pantalla en la zona empotrada son suficientes para movilizar los empujes activo y pasivo en el trasdós y el intradós de la pantalla (figura 2.17). Implícitamente se supone también la existencia de al menos un anclaje ya que de lo contrario no sería posible el equilibrio.

La profundidad del empotramiento vendrá dada por el equilibrio entre los empujes activo, pasivo y la fuerza que ejerce el anclaje. Para encontrar la longitud de clava se toman momentos respecto el punto de aplicación del anclaje e igualando dicha expresión a cero, se obtiene la longitud de clava mínima.

La ecuación resultante tendrá solución siempre y cuando el anclaje este situado por encima de la resultante de fuerzas E_2 (figura 2.15), ya que si no es así el sistema no podría estar en equilibrio. Además, es habitual colocar la cabeza del anclaje cerca de la coronación de la pantalla para aprovechar al máximo su resistencia.

Una vez deducida la profundidad de clava se determina la fuerza necesaria en el anclaje igualando fuerzas horizontales.

La profundidad de clava encontrada corresponde al estado límite, por lo que el factor de seguridad es igual a uno. Será necesario aumentar la longitud de clava aplicando un factor de seguridad. Los factores de seguridad a aplicar en cada caso se tratan en el capítulo 5.

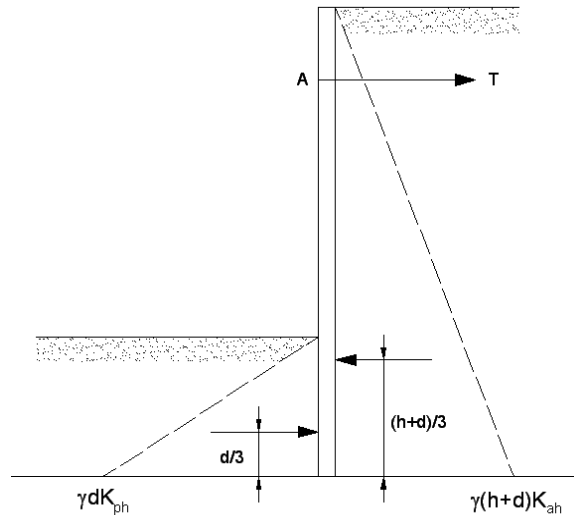


Figura 2.17 Esquema de pantalla de soporte libre

Método del soporte fijo

En este método la longitud de empotramiento es más elevada y se considera que la deformada de la pantalla tiene un punto de inflexión por debajo del nivel de excavación (figura 2.18).

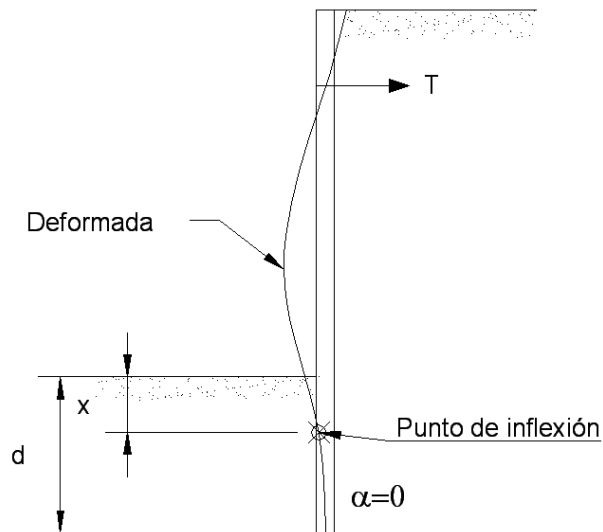


Figura 2.18 Deformada de pantalla anclada en soporte fijo

La deformada es la que se indica en la figura 2.18 y la hipótesis a cumplir es que la ley de empujes a ambos lados de la pantalla corresponderá a los estados límite, es decir, actuará el empuje pasivo en el intradós y el activo en el trasdós.

La forma habitual de resolver la pantalla por este método fue desarrollado por BLUM en 1931 [7] dando una serie de reglas que permiten simplificar el cálculo.

Blum obtuvo para el caso de suelo no cohesivo una relación entre el coeficiente de empuje activo, K_a , y la distancia relativa del punto de inflexión al nivel de excavación.

Otros autores consideran que se puede hacer coincidir el punto de inflexión con el punto de empujes netos nulos.

Esta simplificación permite obtener de manera directa la profundidad necesaria de empotramiento, dado que en el punto de inflexión el momento flector es nulo, y se puede descomponer la pantalla en dos vigas simplemente apoyadas tal como se indica en la figura 2.19. Este método, como se ha dicho, fue desarrollado por BLUM [7] y es conocido como el método de la viga equivalente.

En la viga superior las únicas incógnitas son la reacción R_b y T . Mediante equilibrio de momentos en el punto de aplicación del anclaje se consigue prescindir de la variable T (que se obtiene con posterioridad al conocer la longitud de clava) y puede determinarse directamente la variable R_b e introducirse en la viga inferior. En esta última, tenemos dos incógnitas que son: la longitud de la viga y la reacción en el apoyo más bajo. Como sólo interesa la primera de ellas, podemos determinarla tomando momentos respecto dicho apoyo, con lo que queda resuelto el problema si finalmente se calcula la magnitud de T mediante equilibrio de fuerzas horizontales. La profundidad de clava obtenida debe ser mayorada para garantizar que el terreno puede desarrollar la reacción que se ha supuesto en el apoyo más bajo.

Los cálculos realizados con este método dan resultados menos parecidos a la realidad que los que se obtienen con el método de soporte libre en base a la experiencia acumulada en la ejecución de pantallas.

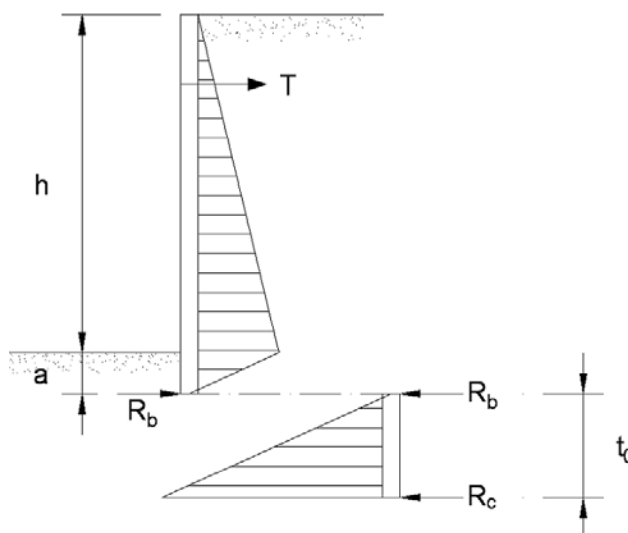


Figura 2.19 Método de la viga equivalente de Blum

3 EL PROGRAMA PLAXIS

3.1 Introducción

El presente capítulo es un resumen del funcionamiento del programa Plaxis y su contenido se divide en dos partes:

- i. Esquema general de funcionamiento (apartado 4.2) que proporciona conceptos básicos del funcionamiento global de Plaxis.
- ii. Metodología para la modelación de pantallas (geometría, estructuras y datos de partida) que permite dar consistencia a los análisis efectuados y comprender el origen de los resultados obtenidos para su posterior interpretación.

3.2 El programa de elementos finitos Plaxis

PLAXIS es un programa comercial de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos modelables en condiciones de deformación plana o con axisimetría, utilizando una interfaz gráfica que permite generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema a tratar.

La interfaz de usuario, es decir, el menú principal del programa, está constituido por cuatro subprogramas:

1. Input (Entrada): introducción de la geometría y datos de los materiales.
2. Calculations (Cálculos): cálculo del problema mediante elementos finitos.
3. Output (Resultados): análisis de los resultados.
4. Curves (Curvas): elaboración de gráficas e informes.

Estos subprogramas se pueden seguir de forma sucesiva lo que constituye una metodología de trabajo lógica y completa a la hora de preparar y analizar un problema geotécnico mediante la utilización del programa.

A continuación se describe brevemente el concepto operativo básico de cada subprograma así como la manera de proceder en cada uno de ellos.

El subprograma de introducción de datos (input)

Contiene todos los elementos necesarios para crear y modificar un modelo geométrico mediante diferentes barras de herramientas y objetos a fin de configurar el problema geotécnico a través del siguiente esquema:

- General settings (configuración general): especificación del nombre, descripción, tipo de elemento finito (6 o 15 nodos), unidades, etc.

- Geometry (geometría): creación de la geometría usando líneas, puntos, pantallas, membranas y anclajes.
- Loads (cargas): aplicación de condiciones de contorno, cargas y/o desplazamientos.
- Materials (materiales): asignación del conjunto de datos para materiales tipo suelo y/o estructuras y elección del modelo constitutivo.
- Mesh (malla): generación de la malla de elementos finitos con aplicación del grado de refinamiento deseado de la misma, tanto de forma general, local o sobre elementos de la geometría.

La descomposición del dominio en elementos finitos constituye la malla y es necesaria para llevar a cabo los cálculos. Plaxis utiliza un sistema automático de generación de malla compuesto por elementos básicos triangulares (de 6 o 15 nodos), dando como resultado mallas “no estructuradas” que a pesar de su aparente desorden, su adaptabilidad y rendimiento numérico son, por lo general, superiores a las mallas regulares.

Se ha trabajado siempre con triángulos de 15 nodos ya que proporcionan una interpolación de cuarto orden para los desplazamientos con doce puntos de integración numérica de Gauss en los que se evalúan las tensiones. El triángulo de 15 nodos proporciona una gran exactitud, aunque por el contrario, conduce a un consumo elevado de la memoria y a un rendimiento bajo en las operaciones.

- Initial conditions (condiciones iniciales): una vez creado el modelo y la malla, se especifica el estado tensional y la configuración inicial mediante el módulo dedicado a generación de condiciones iniciales referentes al flujo y generación del campo de tensiones efectivas iniciales sin tener en cuenta elementos estructurales.

De este modo, siguiendo la barra de herramientas de izquierda a derecha se obtiene, en general, un modelo totalmente definido.

El programa de cálculos (calculations)

Posteriormente a la definición del modelo de elementos finitos se hace necesario definir qué tipo de cálculos se han de llevar a cabo y qué tipo de cargas o etapas de construcción deben activarse durante los cálculos.

El programa de cálculo se centra exclusivamente en los análisis de deformación y distingue entre un cálculo plástico (plastic), de consolidación (consolidation), de seguridad (phi reduction) y dinámico (dynamic). Además cada proyecto puede dividirse en diferentes fases simulando etapas constructivas. Son ejemplos de estas etapas la activación de una carga en particular, cálculo de un factor de seguridad o diferentes profundidades de una misma excavación.

Al introducir plasticidad en un cálculo mediante elementos finitos, como es el caso de todos los análisis efectuados, las ecuaciones pasan a ser no lineales exigiendo en cada fase de cálculo una resolución en una serie de pasos de carga. En Plaxis hay diversos procedimientos disponibles para la resolución de problemas de plasticidad no lineales basados, todos ellos, en una selección del tamaño de los pasos. La selección

correcta de dicho procedimiento es automática según sea más o menos apropiado para garantizar unos resultados óptimos. Estos procedimientos están controlados por medio de un cierto número de parámetros de control que mantienen un equilibrio entre la robustez, la exactitud y la eficiencia pudiendo incidir también manualmente sobre ellos para tener un control más estricto sobre la exactitud y el tamaño de los pasos.

El programa de resultados (output)

Los principales resultados de un programa de elementos finitos son los desplazamientos en los nodos y las tensiones en los puntos de tensión, incluyendo además los esfuerzos en los diferentes elementos estructurales que aparezcan.

El subprograma Output contiene los dispositivos para ver y elaborar listas de resultados correspondientes a los resultados de las diferentes fases de cálculo para obtener deformaciones y tensiones en el terreno, estructuras e interfaces.

Los resultados pueden ser mostrados de diferentes formas ya sea mediante sombreados, líneas, flechas, crucetas u otras representaciones pero todos tienen en común que pueden ser listados en tablas. Los listados, y gracias a que Plaxis utiliza una estructura familiar a la del entorno Windows, pueden exportarse a diferentes aplicaciones de Office (principalmente Excel) para llevar a cabo el estudio, manejo, análisis y comparación de los resultados. Más adelante se comentará el post proceso de los resultados para cada caso y sus principales peculiaridades.

El programa de curvas (curves)

Este programa puede ser utilizado para el trazado de curvas de carga-desplazamiento o tiempo-desplazamiento, diagramas tensión-deformación y trayectorias de tensión o deformación de puntos previamente seleccionados de la geometría.

En general no se ha utilizado este subprograma en la elaboración de la tesina ya que las gráficas que proporciona el programa están limitadas a unos pocos puntos previamente escogidos y dada la manipulación y comparación de los resultados que se ha buscado con respecto los métodos clásicos analíticos, no ha resultado una herramienta con una buena adaptación para el desarrollo de la tesina.

3.3 Modelización de pantallas

La simulación de pantallas en Plaxis implica la intervención de numerosos parámetros, tanto del terreno como de las estructuras y cargas, necesarios para un cálculo completo.

A medida que se va construyendo el modelo se van introduciendo datos geométricos y geotécnicos. A continuación se describen brevemente.

3.3.1 Geometría

El primer paso consiste en la creación de la geometría del modelo. La ventana de configuración general (figura 3.1) permite establecer, entre otras cosas, el tipo de tratamiento del problema ya sea en deformación plana o axisimetría, y el número de nodos por triángulo.

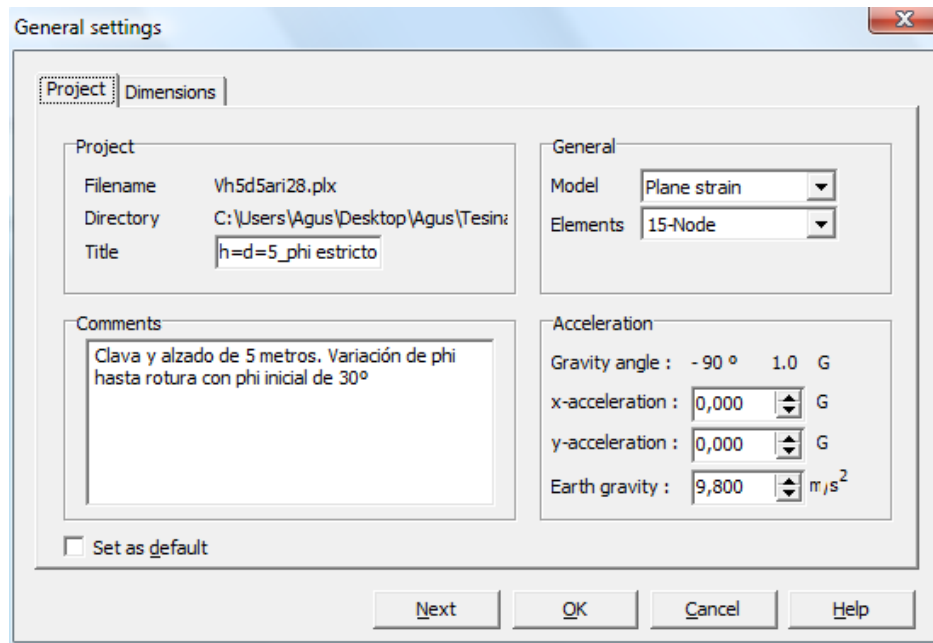


Figura 3.1 Ventana de configuración general

Las dimensiones del dibujo dependen del tipo de pantalla estudiado, ya que al variar alzados y clavos junto con la aplicación de elementos estructurales tales como anclajes, se debe particularizar para cada caso en función del área de influencia observado en los resultados. Por lo tanto, si se observa que los resultados relevantes de un modelo, por ejemplo los desplazamientos del terreno producidos por la pantalla, quedan impedidos por unas dimensiones insuficientes del espacio modelo, se deben modificar dichas magnitudes para permitir la completa representación de los efectos que sean importantes.

Adoptar unas dimensiones apropiadas de la geometría del problema es importante por dos motivos:

- i. En primer lugar hay que tener en cuenta que geometrías muy extensas tienen un coste computacional elevado. Además, la información que proporcione en puntos alejados no será relevante ya que se sitúan fuera del radio de influencia de la pantalla.
- ii. En segundo lugar, representaciones geométricas pequeñas en exceso en comparación con el problema de pantallas a tratar, proporcionará resultados poco realistas al estar influenciados por las condiciones de contorno impuestas en los límites del modelo, sin que permita apreciar claramente los efectos que causa la pantalla.

A continuación se describen las herramientas utilizadas para la representación de cada elemento del modelo: suelo, pantalla condiciones de contorno y anclajes.

Modelización del terreno

El terreno viene representado por el conjunto de líneas que no pertenecen a ningún otro elemento como por ejemplo una estructura. Un conjunto de líneas que forman una poligonal cerrada constituyen dominios de terreno independientes. Esto significa que a cada dominio (cluster) se le puede asignar un conjunto de datos del terreno diferente

para poder simular, por ejemplo, una determinada estratigrafía o bien se puedan activar o desactivar de forma independiente según se quiera o no que intervenga en el cálculo para representar, por ejemplo, el avance de una excavación por etapas.

El conjunto de dominios de suelo constituyen el terreno del modelo. El elemento nº1 de la figura 3.2 representa los ejemplos de dominio de terreno.

Modelización de pantallas e interfases

Las pantallas pueden simularse utilizando la herramienta de “placas” (plates).

La creación de una placa implica la creación de una línea geométrica y en consecuencia puede crear particiones de dominios de terreno. Esta característica permite crear rápidamente el trasdós y el intradós de una pantalla a partir de cualquier geometría del suelo.

Las placas representan objetos estructurales tipo viga rectangular y por tanto requieren que se especifique su rigidez a flexión (EI) y a esfuerzos normales (EA). El espesor equivalente de la placa se hace mediante la siguiente transformación:

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (\text{ec. 3.1})$$

De esta forma, mediante una línea, se evita hacer la densa discretización mediante malla para la pantalla disminuyendo el coste computacional.

Adjunto a la pantalla se ha colocado un elemento de Plaxis llamado “interfase” (interface) utilizado con una doble finalidad. La interfase persigue evitar los picos de tensiones y deformaciones en las esquinas inferiores producidos por la presencia de estructuras como pantallas al mismo tiempo que simula la interacción suelo-estructura disminuyendo el valor de la resistencia del terreno en este contacto. A fin de simular los métodos analíticos, la resistencia del terreno alrededor de la pantalla no se ha disminuido asumiendo la hipótesis de un contacto con la misma resistencia que el terreno.

El elemento nº 2 de la figura 3.2 representa la pantalla y la interfase es la línea de puntos situada a lado y lado.

Modelización de anclajes

Los anclajes utilizados en el terreno están compuestos por dos partes: la longitud libre y el bulbo.

La longitud libre, que atraviesa la cuña de rotura, normalmente la compone un cordón o cable de acero cuya función es transmitir desde el punto de anclaje hasta el bulbo, situado fuera de la cuña de rotura, las tensiones que soporta la pantalla debido al empuje de tierras. El elemento nº 3 de la figura 3.2 representa la longitud libre.

El bulbo consiste en la parte del cordón rodeada de una inyección, normalmente de lechada de cemento que, debido a su longitud y diámetro (función del terreno y carga), resiste por rozamiento las fuerzas transmitidas por la longitud libre y por ende, los empujes del terreno sobre la pantalla.

La herramienta de Plaxis “anclaje de nodo a nodo” (node-to-node anchor), que simula la longitud libre del anclaje, se trata de un elemento elástico que permite la transmisión de carga de uno a otro punto del anclaje simulando la longitud libre. Al tratarse de dos puntos en los que se concentra la tensión, ya que la longitud intermedia que los separa únicamente actúa como transmisor de cargas, el bulbo no queda bien representado. Por este motivo el bulbo se ha simulado mediante la utilización de la herramienta “geomalla” (geogrid) (elemento nº 4 de la figura 3.2).

La geomalla unida al extremo del anclaje nodo a nodo permite representar un elemento lineal sobre el que distribuir en toda su longitud las cargas transferidas por la longitud libre.

El diámetro del bulbo no puede simularse mediante el mecanismo descrito, no obstante una buena aproximación ha sido conferir al geotextil una rigidez equivalente a la del cable de acero. Debido a esta simulación del anclaje no pueden reproducirse dos fenómenos importantes en el dimensionamiento de anclajes: el deslizamiento entre bulbo-cable y bulbo-terreno. Ambas comprobaciones deben llevarse a cabo a posteriori.

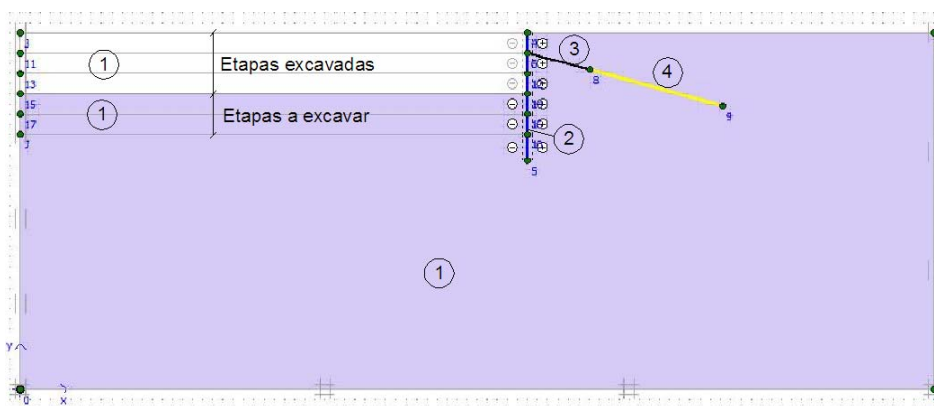


Figura 3.2 Representación de los elementos que constituyen la geometría del modelo. (1) Dominios de suelo. (2) Pantalla. (3) Longitud libre. (4) Geotextil (bulbo de anclaje).

3.3.2 Condiciones de contorno y cargas

Plaxis permite introducir en el modelo condiciones de contorno y cargas conocidas. De todas las opciones disponibles tan sólo se ha empleado la llamada “Fijación estándar” (standard fixities). Esta condición de contorno es muy utilizada en muchos problemas geotécnicos como una aplicación rápida y cómoda. En el caso de pantallas ha sido de gran utilidad debido a que se ajusta a las necesidades del análisis:

- A las líneas verticales correspondientes a la coordenada X mayor y menor que constituyen la frontera del modelo les asigna una fijación horizontal en la que el desplazamiento lateral es nulo ($U_x=0$).
- A las líneas geométricas que son frontera inferior del modelo les asigna un desplazamiento nulo tanto en dirección vertical como horizontal ($U_x=U_y=0$).

Las cargas exteriores que Plaxis permite representar son de dos tipos: puntual y repartida. Únicamente deben introducirse en la geometría y activarlas en el subprograma de cálculo cuando se desee que intervengan.

3.3.3 Propiedades de los materiales

La aplicación de las ecuaciones constitutivas del modelo de elementos finitos requiere la utilización de una serie de parámetros o datos previos, en función del tipo de material, para que el problema pueda ser resuelto. Se trata de propiedades del terreno que usualmente se obtendrían de estudios geotécnicos. Posteriormente se puede analizar la sensibilidad de los resultados a cada uno de ellos.

La potencia de cálculo de los elementos finitos viene acompañada del manejo de numerosas variables a las que hay que proporcionar un valor numérico. En este sentido la dificultad radica en conocer bien el significado de cada una de estas variables, a menudo invisibles en los métodos analíticos clásicos, y adoptar magnitudes que sean coherentes entre sí para proporcionar consistencia al modelo.

En el caso de la tesina se ha podido comprobar el consumo de tiempo que ha supuesto ejecutar un mismo análisis con variaciones de los parámetros que intervienen. En muchas ocasiones los resultados no han variado significativamente al modificar algunos parámetros o bien han aparecido problemas numéricos que exigieron nuevas comprobaciones que permitiesen confiar en el resultado. El análisis se ha centrado en observar los cambios en el comportamiento de las pantallas variando aquellos parámetros o datos más significativos que permitiesen establecer la comparación con métodos analíticos de cálculo.

Los principales parámetros que han intervenido son: ángulo de rozamiento; cohesión; rigidez de pantallas y anclajes y fuerza de tesado del anclaje.

Antes de abordar la metodología de cálculo adoptada es conveniente conocer el valor de entrada que requiere el programa para cada material.

Datos para materiales tipo suelo e interfaces

Los datos que rigen las propiedades del terreno se clasifican mediante tres categorías:

- i. General (figura 3.3):
 - *Modelo constitutivo (material model)*: el empleado en todos los casos ha sido del tipo Mohr-Coulomb, aproximación de primer orden al comportamiento real del suelo.
 - *Tipo de comportamiento (material type)*: en los casos analizados es "drenado", por lo que intervienen el ángulo de rozamiento y la cohesión.
 - *Peso específico (saturado y no saturado) y permeabilidad*: debido a la no presencia de agua, tanto la permeabilidad como el peso específico saturado no intervienen en los cálculos.

El índice de poros y la permeabilidad no se han utilizado. Estos parámetros tienen peso en un análisis de consolidación y no de rotura plástica como los que se presentan en esta tesina.

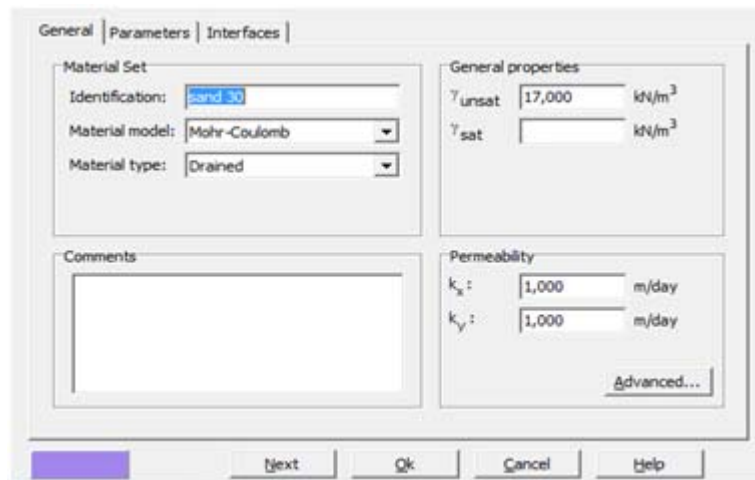


Figura 3.3 Pestaña de Configuración General

ii. Parámetros (figura 3.4):

- *El módulo de Young (E)*: Se ha escogido en general un valor medio representativo para suelos de $1,3 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$, coherente con el nivel de tensiones y la trayectoria esperada en los casos analizados, y sólo en un caso de pantallas en voladizo se ha hecho un análisis para estudiar la influencia de su valor sobre el resultado. En general valores muy altos o muy bajos proporcionan muchos problemas numéricos de convergencia y su intervención no ha sido estudiada en profundidad.
- *Coefficiente de Poisson (ν)*: se ha adoptado un valor de 0,3 en concordancia con el comportamiento escogido de condiciones drenadas. Habitualmente éste es el valor que, para suelos drenados, representa disminuciones significativas de volumen. La modificación de este parámetro se ha estudiado, sin resultados destacables, en la trayectoria de tensiones en pantallas ancladas a un nivel.
- *Parámetros alternativos de rigidez*: son el módulo de corte (G) y el edométrico (E_m) calculados a partir del módulo de Young y del coeficiente de Poisson.
- *Cohesión*: componente resistente que contribuye a mantener la estructura del suelo sin la acción de fuerzas exteriores.

Para los casos analizados de pantallas se ha adoptado un valor inicialmente nulo de la cohesión. No obstante, su influencia en la resistencia del terreno ha conducido a tener en cuenta su influencia sobre el factor de seguridad. En los capítulos referentes al análisis de pantallas se ha estudiado la relación existente entre el ángulo de rozamiento interno y la cohesión

- *Ángulo de rozamiento interno*: principal parámetro resistente del suelo. Su papel en el factor de seguridad y el tratamiento hecho de este parámetro se explica en capítulos posteriores donde su intervención en las estrategias de cálculo ha sido destacable.
- *Ángulo de dilatación*: no se ha tenido en cuenta en el estudio de pantallas dado que principalmente cobra sentido en suelos muy sobreconsolidados.

- *Parámetros avanzados*: esta opción ha permitido introducir la eliminación de tracciones (tension cut-off) mediante la cual el terreno no soporta esfuerzos de tracción. Esta opción se ha empleado en todos los análisis y es perfectamente coherente con el comportamiento de pantallas estudiado, con la práctica habitual de los métodos clásicos y con la adopción de un valor nulo, o en su defecto muy pequeño, de la cohesión.

Figura 3.4 Pestaña de Parámetros

iii. Interfases:

En esta categoría se elige la resistencia de la interfase. Se ha elegido como la opción “rígida” para no disminuir la resistencia del terreno entre pantalla y terreno actuando únicamente como elemento de transición de tensiones entre ambos elementos. De este modo se parte de la misma hipótesis de los métodos clásicos.

Una vez asociado al dominio de terreno sus propiedades, es necesario asignar manualmente a cada dominio el coeficiente de empuje al reposo para el cálculo posterior de tensiones. En todos los casos se ha utilizado un valor de $K_0 = 0,485$ correspondiente a un suelo normalmente consolidado.

Datos para placas (pantallas)

El conjunto de datos para placas está contenido en una única ventana en la que se determinan sus propiedades (figura 3.5).

El modelo constitutivo que rige la relación tensión-deformación en las pantallas se ha escogido “elástico” para todos los casos analizados. La elección de este modelo permite simplificar los cálculos y el análisis de los resultados en comparación a los métodos clásicos y es coherente con la realidad, ya que generalmente las pantallas se dimensionan para tener un comportamiento elástico.

Los datos a introducir son:

- *Rigidez axial (EA) y a flexión (EI)* : se ha escogido un valor del módulo elástico de $35 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$ representativo de un hormigón habitual utilizado en pantallas, y un área e inercia correspondientes a un espesor de pantalla de 40 cm.
- *Peso (w)*: es el resultado del producto entre peso específico y espesor de la pantalla. Se obtiene un valor por metro cuadrado que el programa aplica a la altura total de la pantalla por metro perpendicular al plano.
- Coeficiente de poisson (ν) y coeficientes de rayleigh: en general para estructuras delgadas flexibles en la dirección perpendicular al plano se aconseja un valor cero de poisson. Los coeficientes de rayleigh son propios de un análisis de propagación de ondas y por tanto su valor también se ha tomado cero.

Material set	
Identification:	Ptila_H_3
Material type:	Elastic
Comments	
E=35*10^6 densidad= 28 KN/m3	

Properties	
EA :	1,400E+07 kN/m
EI :	1,867E+05 kNm ² /m
d :	0,400 m
w :	11,200 kN/m/m
ν :	0,000
M _p :	1,000E+15 kNm/m
N _p :	1,000E+15 kN/m
Rayleigh α :	0,000
Rayleigh β :	0,000

Ok Cancel Help

Figura 3.5 Ventana de asignación de parámetros para elementos tipo viga

Datos para geomallas (bulbo de anclaje)

Las geomallas representan materiales geotextiles elásticos que se extienden en la dirección perpendicular al plano y que tan sólo son capaces de soportar esfuerzos de tracción. Su comportamiento elástico es modelizado por el valor de la rigidez axial $EA = 3,3 \cdot 10^4 \text{ kN/m}$

La magnitud de este valor corresponde al de “anclaje nodo a nodo” dividido por la distancia entre anclajes para proporcionar una rigidez equivalente del bulbo.

Datos para “anclaje nodo a nodo” (longitud libre)

La manera de proceder para esta herramienta es idéntica a la geomalla. Se ha especificado un comportamiento elástico sin plastificación (por las mismas razones expuestas en el caso de las placas). El valor de rigidez axial es el mismo que el utilizado en la geomalla y correspondiente a un cable de acero obtenido del dimensionamiento del anclaje.

La diferencia respecto la geomalla es la introducción de la interdistancia de anclajes para obtener automáticamente la rigidez equivalente. En la figura 3.6 se muestra un ejemplo con los valores empleados.

The image shows a software dialog box titled 'Material set'. It is divided into three main sections: 'Material set', 'Comments', and 'Properties'.
 - The 'Material set' section contains two input fields: 'Identification:' with the text 'Long. libre' and 'Material type:' with a dropdown menu showing 'Elastic'.
 - The 'Comments' section is a large empty text area.
 - The 'Properties' section contains four input fields: 'EA:' with '5,800E+04' and unit 'kN', 'Lspacing:' with '1,750' and unit 'm', 'F_{max,tens}:' with '1,000E+15' and unit 'kN', and 'F_{max,ccmp}:' with '1,000E+15' and unit 'kN'. Below these fields is the text 'Values per anchor !'.
 - At the bottom of the dialog are three buttons: 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Figura 3.6 Ventana de parámetros para Anclaje Nodo a Nodo

El origen de los valores para bulbo y anclaje se desarrolla en el capítulo 5 y el anejo correspondiente al dimensionamiento del anclaje.

3.3.4 Generación de la malla y tensiones iniciales

La división del dominio en elementos finitos en los que realizar los consiguientes cálculos constituye la discretización del problema y se representa mediante la malla.

La malla se ha generado mediante un análisis preliminar en el que se utiliza una malla grosera (de pocos elementos). Seguidamente se observan los puntos o zonas donde se producen concentración de tensiones, deformaciones o fenómenos en los que se desea una mejor precisión y se ajusta la malla global del modelo en esas zonas para tener en cuenta posibles fenómenos locales, manteniendo un cierto equilibrio con el consumo de tiempo del cálculo. Se ha comprobado que a pesar de que un mallado muy fino proporciona una mejor precisión de los resultados, el consumo de tiempo de cálculo aumenta y en consecuencia se ha decidido sacrificar precisión para conseguir un mejor equilibrio con el tiempo.

En los elementos que requieren una especial atención tales como pantallas o anclajes, donde se ha exigido mayor precisión de los resultados para su posterior análisis, la malla se ha refinado mediante el factor de refinamiento local, que reduce el tamaño de los elementos proporcionalmente al valor introducido.

En general el grado de refinamiento global ha sido de tipo “fino” (fine) con un refinamiento local en pantallas y anclajes entre 0,25 y 0,5.

Establecida la malla óptima, el último paso antes de proceder con los cálculos consiste en establecer las condiciones iniciales correspondientes al flujo y tensiones.

Cuando se establecen las tensiones iniciales el programa desactiva por defecto todos los elementos diferentes a los de tipo suelo, como punto de partida de las tensiones del terreno previo a cualquier actuación. En todo momento se ha supuesto un suelo normalmente consolidado representado por un valor nulo de los parámetros OCR y

POP, correspondientes al grado de sobreconsolidación y presión de preconsolidación respectivamente.

3.4 Cálculo de una pantalla

En el trabajo desarrollado se ha escogido un esquema de cálculo que permitiese la comparación con los métodos clásicos y proporcionase un procedimiento homogéneo que se pudiese aplicar al conjunto de casos analizados.

Las características con las que el programa lleva a cabo los cálculos influyen notablemente sobre los procesos considerados. Son posibles ejemplos el tiempo de aplicación de una carga, los pasos de carga utilizados, el número de iteraciones o el error tolerado (si se admiten errores mayores será más fácil obtener resultados aunque menos fiables).

Fases de cálculo y construcción por etapas

El primer paso a completar consiste en la definición de las diferentes fases de cálculo que deseamos realizar sobre el modelo creado.

El concepto de fases de cálculo está muy asociado a la construcción por etapas en el sentido de que, para cada fase, podemos activar o desactivar los elementos creados (pantalla, anclaje, cargas, dominios de suelo) en la geometría del modelo para que intervengan en el cálculo.

En el caso de pantallas se puede calcular la estabilidad de la pantalla llevando a cabo pasos intermedios de excavación tal y como sucede en la realidad. La opción de simular la evolución de la ejecución de una pantalla ha permitido observar, no sólo cuánto se alejan los métodos simplificados de procesos más realistas, sino otros aspectos tales como la evolución de los esfuerzos y deformaciones de una pantalla, o la importancia de colocar el anclaje en función de la excavación producida hasta el momento.

Por lo tanto, la desactivación de dominios de terreno en el intradós de la pantalla simulando profundidades de excavación, en donde cada etapa requiere de un cálculo completo, ha constituido una herramienta básica en la simulación de pantallas. Es necesario resaltar el consumo de tiempo que esto supone. Si se ha de probar diferentes ángulos para determinar en cuál de ellos se produce inestabilidad, y a su vez para cada ángulo simular una construcción por etapas que se acerque más a la realidad, el consumo de tiempo y memoria es muy elevado.

Por ejemplo, una pantalla de 5 m de alzado en la que se simulan 5 etapas de excavación con la activación de un anclaje, resultaría:

- Fase 1: excavación 1 m (desactivación del dominio superficial creado en el modelo)
- Fase 2: excavación de 1 m. Total 2 m
- Fase 3: activación del anclaje con fuerza de tesado
- Fase 4: excavación de 1 m. Total 3 m
- Fase 5: excavación de 1 m. Total 4 m
- Fase 6: excavación de 1 m final. Total 5 m

Si el ejemplo anterior se analizase con 1, 2, 5 y 10 etapas de excavación se obtiene aproximadamente un total de 22 fases de cálculo para un solo ángulo. A su vez, si se estudian 10 ángulos se tienen 220 fases de cálculo, aproximadamente. Naturalmente este gran número de fases ha sido realizado al necesitar un cálculo sistemático en esta tesina para mostrar la convergencia hacia la solución en rotura al disminuir la resistencia. En la práctica este proceso se realizaría de forma más eficiente, o bien, por el método de reducción de parámetros.

Es frecuente que para un mismo ángulo no se consiga convergencia en todos los casos en función del número de etapas simulado. Aspecto que introduce incertidumbre en el resultado. Esto sucede con más frecuencia a medida que nos acercamos al ángulo que sitúa la pantalla en el límite de la estabilidad ya que resulta más difícil alcanzar el equilibrio de fuerzas.

Además, según el número de etapas, tenemos que representar diferentes dominios de suelo en la geometría, que a su vez modifican el tamaño y la forma de la malla (figura 3.7). Esto afecta a los resultados numéricos pues cada malla tiene distribución de errores algo distintos. En consecuencia, para un caso analizado con el mismo ángulo pero calculado varias veces según diferente número de etapas de excavación, el resultado será similar pero puede no ser idéntico, llegando a convergencia en algunos casos y en otros no.

La perturbación que introduce el mallado al diferenciar por etapas obliga a que, para un mismo ángulo, se hayan tenido que realizar varias pruebas cambiando el número de etapas hasta obtener resultados que permitiesen determinar si el ángulo analizado produce, o no, la inestabilidad del conjunto pantalla-terreno.

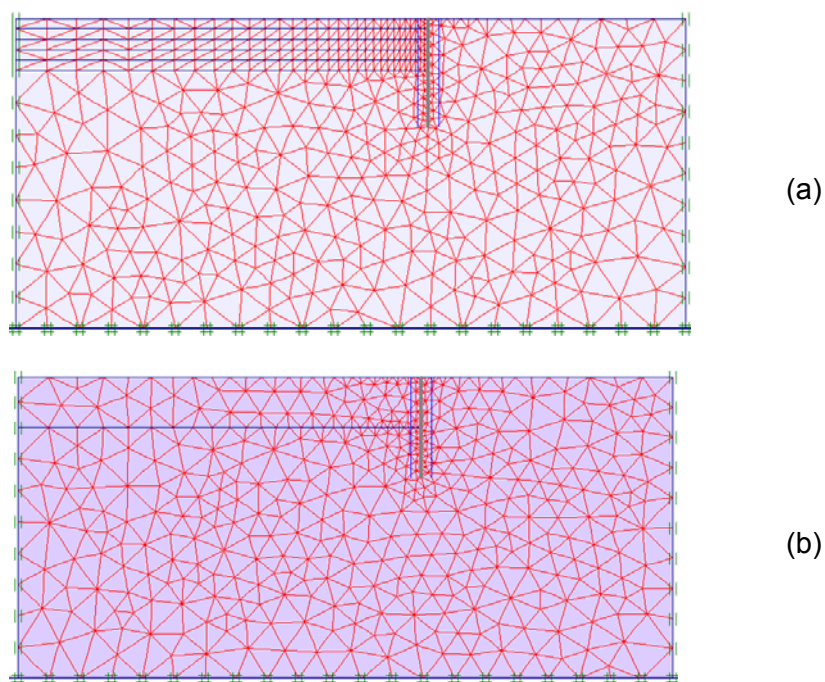


Figura 3.7 Diferencias en la malla según la geometría de etapas de excavación. (a) 5 etapas. (b) 1 etapa.

3.4.1 Tipo de cálculo

El programa de cálculo se centra en un análisis de deformación y distingue entre un cálculo “plástico” (plastic), de “consolidación” (consolidation), un “análisis de seguridad” (phi-reduction) y un cálculo “dinámico” (dynamic).

Todos los casos estudiados se han ejecutado mediante un cálculo de tipo “plástico” en el que se lleva a cabo un análisis de deformación elasto-plástica, sin tener en cuenta el transcurso del tiempo (al no haber estados transitorios por la presencia de presiones intersticiales) y considerar un comportamiento drenado. Esto proporciona una solución razonable de la situación final aún cuando no se siga explícitamente el historial de carga o procesos de consolidación.

3.4.2 Parámetros de control de cálculo

En la pestaña “parámetros” (parameters) de la ventana de cálculos se controlan los siguientes parámetros de una fase en particular:

Pasos adicionales

Especifica el número máximo de pasos de carga (que Plaxis realiza automáticamente) e indica el límite superior de los pasos efectivos para alcanzar el estado último de equilibrio (prescribed ultimate state reached) o bien la rotura del terreno (soil body collapses). Si un cálculo plástico alcanza el número máximo de pasos de carga significa que no se ha aplicado el nivel último de carga y el resultado no es fiable. En general el número de pasos elegido oscila entre 250 y 500 para asegurar la aplicación total de cargas. A medida que nos acercamos al equilibrio límite, mayor es el consumo de pasos de carga, es decir, se necesita usar incrementos de carga menores.

Procedimientos iterativos

Los procedimientos de aplicación de cargas vienen influenciados por algunos parámetros de control que se establecen en el botón de “procedimiento iterativo” (iterative procedure). Plaxis posee una opción de “configuración estándar” (standard settings) sobre estos parámetros que para la tesina, en numerosas ocasiones, no se ha ajustado al modelo al no proporcionar las dos soluciones posibles buscadas: estado último alcanzado o rotura del terreno. Si esta situación tiene lugar, el propio programa recomienda la configuración manual de los parámetros (accuracy condition not reached. Try manual control).

Los parámetros del procedimiento iterativo se componen de:

- *Error tolerado (tolerated error)*: la desviación respecto a la solución exacta debe ser controlada en un intervalo aceptable mediante este parámetro. Dentro de cada paso, el programa de cálculo continúa llevando a cabo iteraciones hasta que los errores calculados son menores que los especificados. El valor del error tolerado obliga a realizar más iteraciones hasta que los resultados entran dentro del límite deseado. En la tesina el error fijado es de 0,01 (diferencia adimensionalizada entre cargas externas y fuerzas en equilibrio con el estado tensional), un valor bajo y aceptable ya que en el caso de pantallas cerca del equilibrio límite, la tendencia a reducirse la tensión por efecto de la plastificación y aumento del desplazamiento puede provocar una desviación excesiva respecto la solución exacta.

- *Sobre-relajación (over-relaxation)*: mecanismo adicional para reducir el número de iteraciones. Dado un escalón de carga, se trata de un parámetro que permite cierta tolerancia en el cumplimiento de la ley constitutiva del material cuando se impone una deformación, permitiendo mayor rapidez en la obtención de la solución que cumple la ley constitutiva en el siguiente paso de carga. Se ha utilizado un valor de 1,2 según recomendaciones del distribuidor del programa.
- *Máximo número de iteraciones (maximum iterations)*: número máximo de iteraciones dentro de un mismo paso de carga. Dado que el resultado es inexacto si se alcanza este número de iteraciones en un cálculo, se ha utilizado el valor máximo permitido por el programa (100 iteraciones).
- *Mínimo y máximo deseado (desired minimum-desired maximum)*: estas aplicaciones se encargan de reconocer las iteraciones llevadas a cabo y disminuir o aumentar el paso de carga (según la rapidez con que se alcance convergencia) para ahorrar tiempo a la vez que suavizan la curva carga-desplazamiento. Se ha utilizado un valor máximo de 50 y mínimo de 20.

Los valores empleados son el resultado del ensayo de numerosos casos en los que se ha comprobado que el programa tuviese la suficiente capacidad para determinar si el conjunto pantalla-terreno alcanzaba el equilibrio o bien se producía colapso.

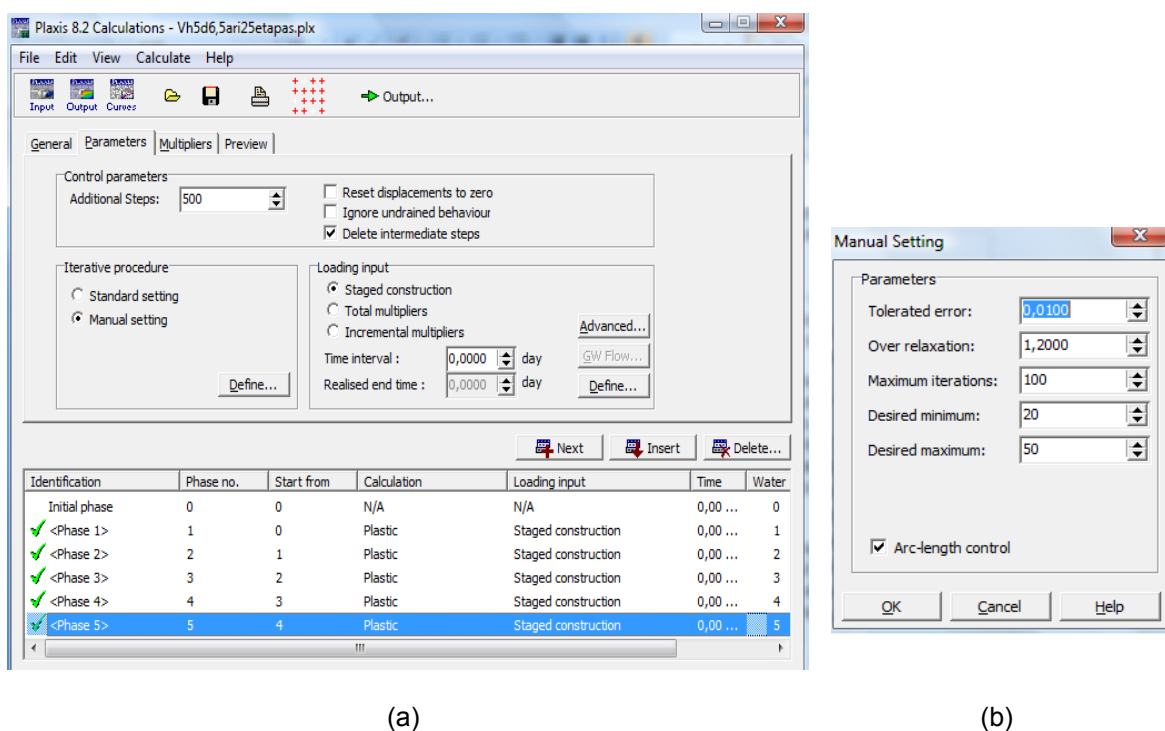


Figura 3.8 (a) Pestaña “Parámetros de Cálculo”. (b) Ventana de configuración manual de “Procedimientos Iterativos”.

3.4.3 Pretensado de los anclajes

Los anclajes en Plaxis son elementos elásticos que se tratan con una cierta rigidez. Su activación se lleva a cabo durante la construcción por etapas pudiendo aplicar una fuerza de pretensado que empuje a la pantalla contra el terreno. Para ello basta con

activar el anclaje e introducir la fuerza que deseamos representar por unidad de longitud.

3.5 Resultados generados

En este apartado se ofrece una breve explicación del tipo de resultados más relevantes. El tratamiento hecho de ellos así como su uso e influencia dentro del análisis de los diferentes casos viene detallado en los capítulos 4 y 5.

3.5.1 ΣM_{stage}

Consiste en un parámetro asociado a la construcción por etapas cuyo significado proporciona la fracción de una etapa de construcción que ha sido completada según las fuerzas que han sido equilibradas. En el inicio de cada etapa su valor es cero y debe ser 1 al final de la misma si se resuelve satisfactoriamente.

3.5.2 Tensiones, deformaciones y desplazamientos

Se trata de los principales resultados buscados en cualquier análisis de elementos finitos. La manera en que se pueden obtener las tensiones así como los desplazamientos y/o las deformaciones son múltiples (totales, incrementales, cartesianas, etc.) y pueden ser representados por diferentes objetos (flechas, sombras o curvas de nivel entre otros).

El desplazamiento horizontal de la pantalla en cabeza, anclaje y pie de clava ha sido de gran utilidad en la determinación del ángulo de rotura. La hipótesis de que a menor ángulo de rozamiento mayor es el empuje de tierras y por lo tanto mayor es el desplazamiento de la cabeza de la pantalla ha permitido representar una gráfica $U_x - \phi$ que permite salvar los errores numéricos para la toma de decisión del ángulo de equilibrio límite.

La visualización de las tensiones mediante sombreado permite clarificar el mecanismo de rotura del terreno que produce el empuje de tierras sobre la pantalla y compararlo con los métodos clásicos. Las tensiones principales, representadas por flechas, permiten observar los estados límites de rotura, activo y pasivo: flechas horizontales mayores que verticales indican un estado pasivo y flechas verticales mayores que horizontales, un estado activo.

3.6 Post-proceso de los resultados

Una vez elaborado y calculado el modelo geotécnico para el estudio de los diferentes casos de pantallas que se han tratado, es necesario manejar los resultados que Plaxis proporciona de modo que puedan realizarse las comprobaciones y comparaciones necesarias para poder extraer las conclusiones objeto de la tesina.

Los elementos finitos proporcionan, como se ha comentado con anterioridad, el campo de tensiones y deformaciones del modelo estudiado mediante la discretización del

dominio mediante la malla. No obstante, debido a su propia formulación, los resultados que se obtienen poseen continuidad del campo de desplazamientos pero discontinuidad del campo de tensiones (esto se traduce en que para un mismo punto, existen dos tensiones diferentes). Por este motivo surge la necesidad de procesar los datos obtenidos para uniformizar los resultados y poderlos comparar y analizar.

En este sentido, el principal problema aparece en el momento de obtener los empujes que el terreno ejerce sobre la pantalla tanto en el intradós como trasdós de la misma. Mientras en placas, anclajes y geomallas, Plaxis proporciona directamente tablas y gráficas del estado tensional y de deformaciones ya uniformizado, puesto que estos elementos no se han discretizado con la malla, no sucede lo mismo con los empujes del terreno. La figura 3.9 muestra cómo para un mismo punto (contacto entre elementos) se obtienen tensiones diferentes. La tabla adjunta a la figura muestra el valor numérico de las tensiones en las coordenada "Y".

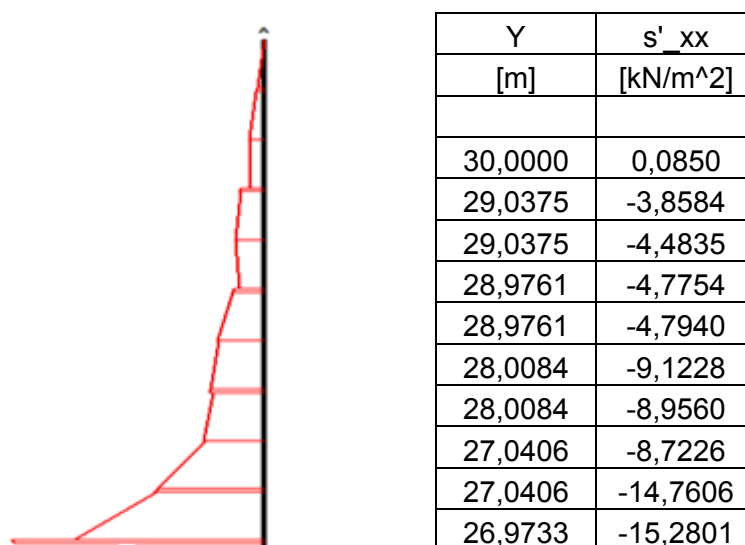


Figura 3.9 Ejemplo de ley de empujes sobre el trasdós de una pantalla. Obsérvese la discontinuidad de tensiones para una misma coordenada "Y" en los puntos entre elementos

La situación mostrada en la figura puede mejorar si se consigue una optimización de la discretización del dominio. Un mayor grado de refinamiento de la malla se traduce en una reducción del tamaño de los triángulos, aumentando su número y en consecuencia el número de nodos y puntos de tensión dónde realizar los cálculos. Trabajando de esta forma se consigue disminuir los saltos de discontinuidad en las tensiones y se obtienen gráficos más reales del estilo que se observa en la figura 3.10. No obstante, el hecho de hacer la malla más fina implica un aumento del número de cálculos y se produce una afectación directa al consumo de tiempo que aumenta a medida que se refina la malla.



Y	s' xx
[m]	[kN/m ²]
30	-0,041053
29,661673	-3,577873
29,661673	-3,393957
29,583289	-3,583709
29,583289	-3,260021
29,233565	-5,181574
29,233565	-4,556125
28,883841	-7,155565
28,883841	-4,061268
28,795654	-5,259921
28,795654	-6,39271
28,460164	-8,661126
28,460164	-8,774905

Figura 3.10 Ejemplo de ley de empujes sobre el trasdós de una pantalla con refinamiento de malla. Obsérvese que las discontinuidades de tensión disminuyen.

Dicho esto, la obtención de los empujes sobre la pantalla para su posterior manipulación requiere un doble proceso para llegar a resultados más útiles y comparables.

Como la determinación de leyes de empujes ha sido una tarea habitual en esta tesina, se describe a continuación la metodología utilizada para ello.

Herramienta de sección transversal

En primer lugar es necesario crear, sobre el modelo ya calculado, un perfil transversal del terreno lo más cerca posible de la pantalla para obtener los empujes que actúan en trasdós e intradós. Esto se lleva a cabo mediante la herramienta “sección transversal”, con la que se obtienen perfiles como los mostrados en las figuras 3.9 y 3.10 con su correspondiente tabla de valores.

Las desventajas de esta herramienta son dos:

- Al tener que trazar manualmente la línea sobre la que obtener las tensiones del terreno no siempre puede hacerse a una misma distancia horizontal de la pantalla ni abarcar de forma precisa la longitud exacta de la altura de la pantalla.
- Los puntos de tensión identificados con la sección transversal no son los mismos para el trasdós e intradós y eso dificulta la obtención de leyes netas al no poder sumar valores de tensión en una misma coordenada.

El siguiente apartado muestra cómo se han solventado parte de estos inconvenientes, en especial la relativa continuidad de la representación de las leyes de tensiones brutas y la obtención de la ley neta de empujes.

Programa desarrollado para la obtención de leyes de tensiones

Para poder manejar los resultados obtenidos se ha desarrollado, mediante una “macro” en hoja de cálculo Excel, un programa que de forma automática proporcione gráficas de las leyes de empujes obtenidos de la sección transversal.

El programa desarrollado en lenguaje Visual Basic permite pegar las tablas de tensiones de la sección transversal de Plaxis y obtener gráficas mediante interpolación lineal entre puntos tomando la media aritmética como valor de la tensión en las discontinuidades.

De esta manera, y dado que la hoja de cálculo también proporciona las leyes analíticas teóricas de los empujes para cada caso, se pueden comparar los resultados proporcionados a través de elementos finitos y los métodos clásicos para pantallas. La figura 3.11 muestra el esquema de las leyes que se representan con el programa desarrollado.

El programa está compuesto por 4 hojas con la siguiente función en cada una de ellas:

1. Hoja “Álbum datos”

En esta hoja se copian directamente los datos proporcionados por la tabla obtenida mediante la herramienta de sección transversal. Estos datos se copian tanto para el trasdós como el intradós donde cada uno está compuesto por tres columnas: la primera es la coordenada “X”, la segunda la coordenada “Y” y la tercera el valor de la tensión correspondiente a las coordenadas.

2. Hoja “Entrada datos”

Consta de cinco módulos

- i. *Módulo Trasdós-Intradós:* en estas dos columnas se copian los datos de la hoja 1 prescindiendo de la coordenada “X” y eligiendo el rango de valores que más se ajusta al extremo superior e inferior de la pantalla debido a que la herramienta sección transversal no se ajusta del todo a la geometría de la pantalla.
- ii. *Módulo Resumen datos:* automáticamente se especifica el número de puntos de tensión introducidos, junto con la coordenada “Y” máxima correspondiente a la cabeza de pantalla y la “Y” mínima correspondiente al punto más cercano al pie de pantalla. También se detecta la tensión máxima y mínima. Todo ello para trasdós e intradós.
- iii. *Módulo Datos Geometría:* en estas celdas hay que especificar el valor de la cota superior de la pantalla y la cota de excavación (parte superior del intradós) en la misma coordenada “Y” introducida en Plaxis. Además se debe especificar la altura de la pantalla y el número de intervalos (discretización) que se quiere hacer de los datos para interpolar los puntos de discontinuidad y suavizar la gráfica de tensiones. El resultado es la eliminación de las discontinuidades de tensión representadas por los números 5 y 6 en la figura 3.11 para trasdós e intradós respectivamente.
- iv. *Módulo Datos Geotecnia:* se introduce el valor del ángulo de rozamiento interno estudiado y el peso específico del terreno. Automáticamente se calcula el coeficiente de empuje activo y pasivo analíticos. Mediante estos

coeficientes se determina los valores del empuje activo y pasivo en la cabeza de pantalla, cota de excavación y pie de pantalla para el trasdós y análogamente, prescindiendo del alzado de la pantalla, para el intradós (números 1 a 4 en la figura 3.11)

- v. *Módulo puntos de interés*: permite introducir las coordenadas de aquellos puntos de interés donde se quiera conocer el valor de la tensión neta y bruta.

3. “Hoja 2”

Se muestran los resultados en todos los puntos de la interpolación de los valores de tensiones llevada a cabo según la discretización con los intervalos indicados.

4. Hoja “Gráfico”

En la figura 3.11 se muestra un ejemplo de gráfico que el programa representa. Las leyes de tensiones representadas son las siguientes:

- Leyes de empujes en el trasdós: empuje activo analítico; empuje pasivo analítico y empuje neto numérico.
- Leyes de empujes en el intradós: empuje activo analítico; empuje pasivo analítico y empuje neto numérico.
- Ley de empujes neta numérica (ley neta del trasdós menos ley neta en intradós).

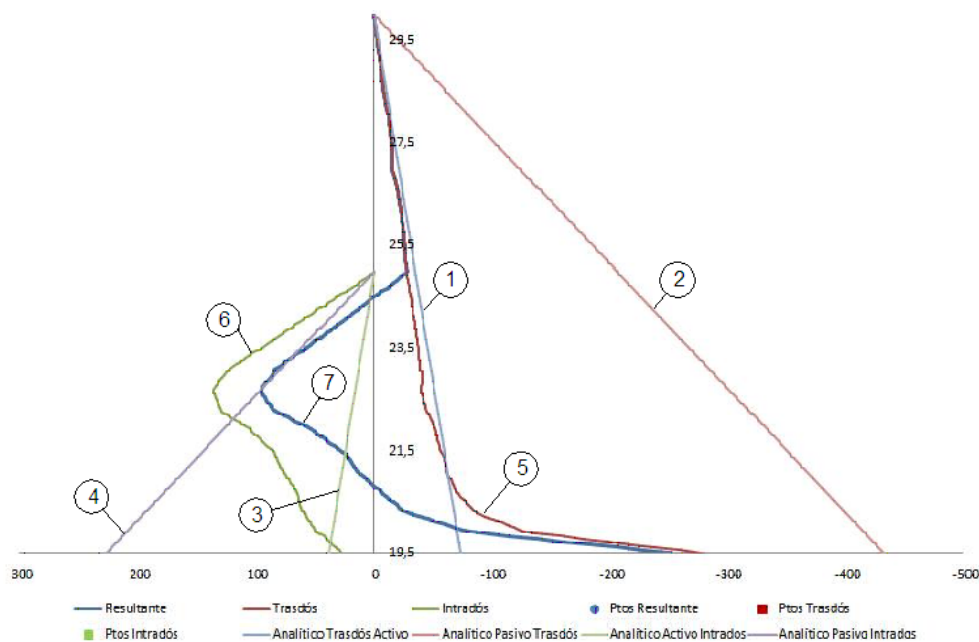


Figura 3.11 Esquema de leyes del programa desarrollado. (1) Analítico activo trasdós. (2) Analítico pasivo trasdós. (3) Analítico activo intradós. (4) Analítico pasivo intradós. (5) Ley numérica neta trasdós. (6) Ley numérica neta intradós. (7) Ley neta total numérica (5-6)

4 ANÁLISIS DE PANTALLAS EN VOLADIZO

4.1 Introducción

El objeto de este capítulo es la comparación y el análisis de los métodos de cálculo para pantallas en voladizo. Las herramientas necesarias para cumplir esta finalidad han sido desarrolladas en los capítulos anteriores y sólo se hará referencia a aquellos aspectos que requieran especial atención. Durante el desarrollo de la investigación se han ido analizando fenómenos de interés a medida que han aparecido.

Con objeto de describir los resultados obtenidos de forma ordenada, se enumeran los casos analizados y la forma en que se han resuelto por métodos clásicos y mediante elementos finitos. Para analizar la bondad de los métodos tradicionales se han utilizado factores de seguridad, que se definirán más adelante, y cuya misión es comparar el caso en rotura con el caso que se obtiene mediante un dimensionamiento por métodos clásicos. Para analizar la verosimilitud de los métodos clásicos se han realizado también comparaciones en tensiones de los resultados obtenidos entre ambos métodos de cálculo, describiendo las diferencias que los alejan.

4.2 Metodología y casos analizados

Un total de 6 casos de pantallas en voladizo han sido estudiados con el siguiente procedimiento:

- I. Elección de alzado y clava inicial (o estricta, en el sentido que se obtiene en situación de equilibrio) de la pantalla.
- II. Obtención por métodos clásicos del ángulo de rotura para clava estricta y para la clava aumentada un 20%.
- III. Simulación de la pantalla en Plaxis. Obtención del ángulo de rotura para la clava estricta y clava aumentada un 20%.
- IV. Comparación del estado tensional y otros aspectos de interés.
- V. Determinación del factor de seguridad.

En el apartado 4.4 se justifica la elección del procedimiento descrito.

Todos los casos que a continuación se enumeran indican la clava inicial e incluyen el análisis con la clava aumentada un 20% (aunque no figura en el título del caso). La tabla 4.1 muestra los casos analizados y sus características de interés.

Todos los casos analizados carecen de sobrepresiones debidas a la presencia de nivel freático ya que se ha supuesto que se encuentra por debajo. Todos los gráficos pertenecientes a cada uno de los casos pueden consultarse en el anejo I de pantallas en voladizo.

Tabla 4.1 Listado de casos estudiados de pantallas en voladizo

Caso	Descripción	Observaciones
Vh3d3	Alzado de 3 m. y clava inicial de 3 m	Estudiar pantallas con igual alzado y distintas clavos pretende simular diferentes calidades de terreno. Mejor terreno requiere menor clava.
Vh3d4,5	Alzado de 3 m. y clava inicial de 4,5 m	
Vh5d5	Alzado y clava inicial de 5 m	
Vh5d7,5	Alzado de 5 m y clava inicial de 7,5 m	
Vh5d7,5-c	Alzado de 5 m y clava inicial de 7,5 m en un terreno con 10 kPa de cohesión	Análisis de un caso con terreno cohesivo. Adicionalmente se obtiene una relación de la variación de $c - \phi$
Vh5d7,5-Q	Alzado de 5 m y clava inicial de 7,5 m con carga exterior	Análisis de un caso con sobrecarga parcial exterior

4.3 Definición del factor de seguridad

A continuación se definen los factores de seguridad que se aplican habitualmente para pantallas en voladizo y que han servido de base de partida para establecer la comparación entre métodos.

4.3.1 Factor de seguridad en la longitud de clava, F_{CLAVA}

Se define d_0 como la longitud de clava obtenida por el cálculo en condiciones de equilibrio cuyo objetivo es el dimensionamiento, y d como la longitud de clava de diseño. El factor de seguridad F_{CLAVA} se aplica a la longitud de clava según la ecuación 4.1.

$$d = d_0 \cdot F_{CLAVA} \quad (\text{ec. 4.1})$$

En el diseño de pantallas, es habitual que el valor de la longitud de clava se incremente un 20% respecto al obtenido por equilibrio. Este incremento se justifica por el uso de simplificaciones en el cálculo de la estabilidad de la pantalla, ya que hay que garantizar que existe suficiente clava como para que se pueda desarrollar el contraempuje.

Como en los casos analizados en esta tesina se adopta una clava de diseño con un incremento de un 20% sobre la clava estricta, acorde con la práctica habitual, este factor de seguridad es de 1,2. Sin embargo, el F_{CLAVA} únicamente nos dice cuánto aumentamos la clava pero no nos dice cuánto se aleja el nuevo estado tensional del equilibrio límite. Es decir, no puede deducirse que la estabilidad analizada mediante

otras variables tenga el mismo factor de seguridad ya que, por ejemplo, no hay una relación lineal entre longitud de clava y los esfuerzos.

4.3.2 Factor de seguridad en los parámetros, $F_{PARÁMETROS}$

El factor de seguridad $F_{PARÁMETROS}$ afecta a los parámetros geotécnicos del terreno. Una forma de definir este factor de seguridad en terreno friccional es:

$$F_s = \frac{\tan \phi_{real}}{\tan \phi_{rotura}} \quad (\text{ec. 4.2})$$

Donde $\tan \phi_{real}$ y $\tan \phi_{rotura}$ son, respectivamente, la tangente del ángulo de rozamiento para el ángulo de rozamiento real del terreno y la tangente del ángulo que provoca inestabilidad.

En la tesina se ha empleado un factor de seguridad que es la combinación del F_{CLAVA} y el $F_{PARÁMETROS}$ ya que ninguno de los factores de seguridad descritos hasta el momento se ajusta a la práctica habitual en el diseño de pantallas.

Mientras que a la clava inicial le corresponde un ángulo de rozamiento que cumple el equilibrio límite, al aumentar la clava en un 20% se modifica el estado tensional y en consecuencia el valor del ángulo de rozamiento que cumple el nuevo equilibrio límite. El cociente de la tangente de ambos valores de ángulo de rozamiento (ecuación 4.3) es la base sobre la que se han definido los factores de seguridad calculados en la tesina.

$$F_s = \frac{\tan \phi_{clava\ inicial}}{\tan \phi_{clava\ 20\%}} \quad (\text{ec. 4.3})$$

4.3.3 Factor de seguridad en los momentos, $F_{MOMENTOS}$

Este factor de seguridad afecta al momento flector que se obtiene en el cálculo de la pantalla, a partir del diagrama de empujes resultante. El factor de seguridad $F_{MOMENTOS}$ se define como el cociente entre los momentos estabilizadores y los momentos desestabilizadores.

$$F_{MOMENTOS} = \frac{M_{estabilizadores}}{M_{desestabilizadores}} \quad (\text{ec. 4.4})$$

En general, este factor de seguridad se aplica en la comprobación de la estabilidad al vuelco de muros y su uso en pantallas no es habitual. Otros factores de seguridad, como el calculado en esta tesina, se ajustan mejor al cálculo de la probabilidad de colapso de este tipo de estructuras.

4.4 Resolución por métodos clásicos

En el diseño habitual de una pantalla se parte de los datos geotécnicos del terreno, principalmente el ángulo de rozamiento interno, de manera que aplicando los métodos

desarrollados en el capítulo 2 “Antecedentes” se puede obtener la clava estricta necesaria para estabilidad. Posteriormente se procede a incrementarla un 20%.

En el presente trabajo se ha procedido de forma inversa. Es decir, a partir de un alzado y clava determinado se ha obtenido el ángulo de rozamiento que conduce a la rotura. Posteriormente se aumenta la clava un 20% y de nuevo se obtiene el ángulo de rozamiento límite de estabilidad. El motivo de proceder así es de tipo práctico, ya que en un modelo numérico es más rápido cambiar las propiedades de los materiales que la geometría.

Resultados obtenidos

En la tabla 4.2 se muestra el valor del ángulo de rozamiento que conduce a la rotura según se tenga la clava inicial dimensionada a partir de equilibrio y la clava incrementada un 20%.

En la tabla 4.2 los valores ϕ_s y ϕ_c corresponden al método simplificado y completo de cálculo por equilibrio. En la práctica el valor del empuje pasivo se suele reducir a dos tercios de su valor teórico, entre otras causas por tratarse de una fuerza estabilizadora. Los valores de $\phi_{s.red}$ y $\phi_{c.red}$ corresponden al valor del ángulo de rozamiento aplicando la reducción del empuje pasivo ($K_p^* = \frac{2}{3} K_p$).

Por sencillez, para los casos en que aparece cohesión y carga exterior, únicamente se han resuelto por el método simplificado de pantallas en voladizo.

Tabla 4.2 Ángulos de rotura según métodos clásicos

CASOS			ÁNGULO DE ROTURA (grados)			
Nombre	h	d	ϕ_s	ϕ_c	$\phi_{s.red}$	$\phi_{c.red}$
Vh3d3	3	3	28,53	30,08	33,5	35
		3,6	25,19	26,68	30,3	31,7
Vh3d4,5	3	4,5	21,43	22,8	26,73	28
		5,4	18,65	19,9	24,1	25,3
Vh5d5	5	5	28,53	30,08	33,53	35
		6	25,19	26,68	30,3	31,7
Vh5d7,5	5	7,5	21,4	22,8	26,7	28
		9	18,6	19,9	24,1	25,3
Vh5d7,5c10	5	7,5	11,9	-	16,6	-
		9	10,3	-	15,4	-
Vh5d7,5-Q	5	7,5	26,5	-	31,5	-
		9	23,5	-	28,62	-

4.5 Resolución con Plaxis

La metodología de cálculo ha consistido en que, una vez determinado el ángulo de rotura mediante métodos clásicos, se reproduce el modelo en Plaxis y se obtiene el ángulo de rozamiento del terreno en el que la pantalla se vuelve inestable mediante sucesivas variaciones del ángulo de rozamiento. De esta forma podemos ver cuánto nos alejamos de los métodos analíticos y proceder a la comparación entre los diferentes ángulos de rotura obtenidos expresando su relación mediante la descomposición del factor de seguridad.

En la utilización de métodos numéricos se presentan dificultades asociadas a problemas de inestabilidad que no es fácil distinguir si son de tipo físico o numérico. Como en esta tesina se realizan cálculos que conducen a rotura del terreno y colapso de la pantalla, normalmente se llega a una situación de inestabilidad también numérica en la que los desplazamientos y deformaciones crecen indefinidamente bajo un estado tensional constante.

Estar cerca del colapso de la estructura geotécnica hace que factores tales como el tamaño de la malla tengan un factor más relevante. De hecho, la rotura del terreno en casos como este está acompañada de un proceso de localización de las deformaciones (plano de rotura donde se concentran las deformaciones al mismo tiempo que en otras zonas permanecen pequeñas) que es difícil de capturar sobre todo si se supone que el medio es continuo.

Obtención del ϕ de rotura

Ya se ha citado que el proceso seguido ha sido variar sucesivamente el ángulo de rozamiento hasta encontrar el valor con suficiente aproximación en que el conjunto se vuelve inestable. En ese momento, y puesto que inestabilidad en Plaxis puede conllevar a la no convergencia (y por lo tanto unos valores de tensiones y deformaciones inexactos), adoptamos el ángulo de rozamiento anterior al de rotura como el valor límite en el que la pantalla todavía es estable. Se trata del ángulo estricto.

Es importante ser cuidadoso al utilizar herramientas de cálculo de tipo numérico de forma que los resultados obtenidos se deben tratar de forma muy crítica. Esto suele conducir a realizar comprobaciones adicionales o cálculos alternativos para verificar que los resultados obtenidos son suficientemente representativos de la situación que se quiere modelar.

Ya se ha comentado que en ocasiones se producen problemas numéricos inducidos por diferentes aspectos relacionados con la geometría, estructura de la malla, datos de los materiales, etc., todo ello porque se llega a la inestabilidad de la pantalla y por tanto resulta más difícil obtener el equilibrio límite. Tener en cuenta todas estas dificultades ha obligado a realizar las comprobaciones y cálculos complementarios que a continuación se presentan.

a) Construcción por etapas

El caso de simular la excavación del alzado en una sola etapa, a pesar de ser poco realista, puede considerarse como una primera aproximación. En el caso de utilizar dos etapas de excavación, la aproximación es más realista que la anterior y el mallado queda modificado y así sucesivamente al añadir más etapas de excavación. Se

deduce entonces que si el mallado es diferente en cada caso, el resultado obtenido también lo será.

A medida que la pantalla se acerca al equilibrio límite por la disminución del ángulo de rozamiento, los pequeños cambios en la malla producen distorsiones de cálculo mayores, que en unos casos pueden afectar a la convergencia. Normalmente la construcción mediante etapas suaviza los cambios tensionales y facilita la aproximación a los estados de rotura.

Para identificar mejor el ángulo estricto se ha ejecutado distinto número de etapas de excavación para un mismo ángulo. Una primera comprobación para la validación del ángulo mediante la construcción por etapas, conduce a las siguientes posibilidades:

- i. El programa converge para todos los casos estudiados con distinto número de etapas. En este caso se interpreta que el ángulo se aleja de la situación de inestabilidad.
- ii. El programa no converge para ningún caso con distinto número de etapas. En este caso, contrario al anterior, no podemos determinar el ángulo estricto previo a rotura. Nos alejamos de la estabilidad límite.
- iii. El programa converge para un determinado número de etapas, y no converge para otros. Se trata de una posibilidad intermedia a las dos anteriores y nos encontramos cerca del equilibrio límite. Hay que hacer más comprobaciones pero se tiene acotado el rango de valores del ángulo estricto.

Normalmente, antes de proceder a la construcción por etapas, se ha llevado a cabo un análisis rápido y con tan sólo una etapa de excavación. De este modo se tiene conocimiento del rango de valores del ángulo de rozamiento en el que aplicar más etapas de excavación, optimizando el tiempo al introducir etapas únicamente cerca de rotura. La tabla 4.3 es un ejemplo del esquema seguido.

La tabla 4.3.a muestra el análisis preliminar con tan sólo una etapa de excavación en el que a partir de 25° se empieza a producir inestabilidad. Esto significa que valores cercanos a 25° o inferiores producirán el colapso del conjunto. La tabla 4.3.b muestra el análisis con diferente número de etapas en ángulos cercanos a 25°. Valores superiores alcanzan equilibrio con todas las etapas de excavación mientras que para 22° todas las etapas producen al colapso (se recuerda que 10 etapas, por ejemplo, significa que el alzado se excava simulando 10 fases de excavación. Lo mismo para 1, 2 y 5 etapas). Por lo tanto, se puede ver que el ángulo previo a rotura estará entre 23° y 25°.

Tabla 4.3 Esquema de estrategia de construcción por etapas

ϕ	Etapas	Estado
35	1	OK
30	1	OK
28	1	OK
26	1	OK
25	1	Colapso
24	1	OK
23	1	Colapso
22	1	Colapso

(a)

ϕ	Etapas	Estado
28	1,2,5,10	OK
26	1,2,5,10	OK
25	1,5	Colapso
	2, 10	OK
24	1,2,10	OK
	5	Colapso
23	1,2	OK
	5, 10	Colapso
22	1,2,5,10	Colapso

(b)

b) Relación ángulo de rozamiento-desplazamiento

La comprobación del ángulo estricto de rotura se complementa mediante la relación entre el desplazamiento de la cabeza de pantalla y el ángulo de rozamiento.

Teóricamente el valor del desplazamiento debe tender a infinito cerca del ángulo estricto de rotura. Es obvio que el desplazamiento infinito no puede obtenerse mediante elementos finitos ya que supone la inestabilidad del conjunto y es imposible obtener convergencia. En consecuencia cabe esperar que los sucesivos estados próximos a inestabilidad generen un aumento de la pendiente de la relación entre ángulo de rozamiento del terreno y desplazamiento ($\phi - U_x$).

Una vez realizado el análisis de construcción por etapas se determina el valor del desplazamiento horizontal en la cabeza de la pantalla para cada ángulo analizado en el que se ha obtenido convergencia. En el momento en que aumentar la pendiente comienza a resultar muy difícil, se considera que estamos ante el ángulo de equilibrio límite. Un ejemplo del resultado obtenido se puede ver en la figura 4.1:

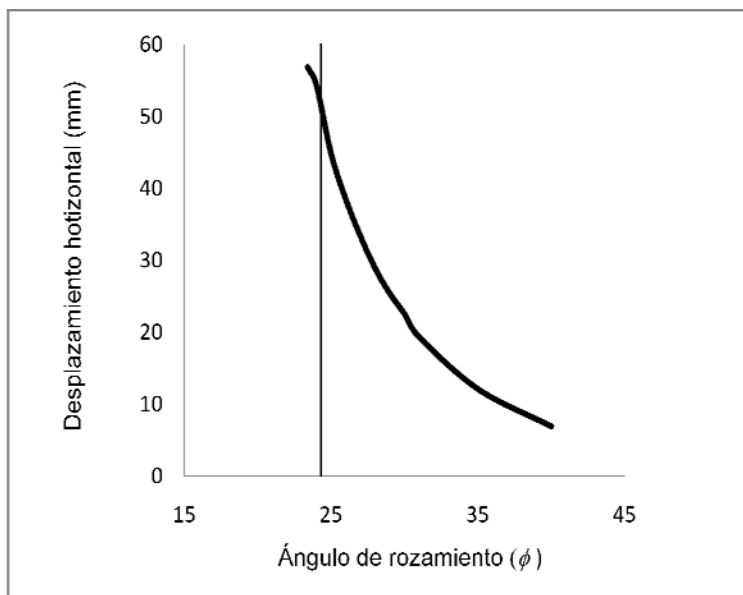


Figura 4.1 Relación ángulo de rozamiento – desplazamiento

La figura 4.1 muestra que a partir de un cierto ángulo (delimitado aproximadamente por la línea vertical), resulta prácticamente imposible que el desplazamiento aumente (la curva tiende hacia la izquierda). Se interpreta que el conjunto se encuentra en el límite y los ángulos situados a la izquierda de la línea se desechan a pesar de que se pueda obtener convergencia con ellos en algún caso con etapas de excavación. En algunos casos de ángulo de rozamiento cerca del de rotura, los desplazamientos obtenidos no corresponden a un resultado final en situación de equilibrio límite, como se explica en el siguiente apartado.

c) Ángulo de rozamiento- Σ MStage

Adicionalmente a la construcción por etapas y a la relación $\phi - U_x$, se ha comprobado el parámetro computacional: Σ MStage. Esta variable nos dice el porcentaje de carga que el programa ha sido capaz de aplicar siendo uno en caso de convergencia y menor a uno en el resto de casos. Si no se llega a la unidad, los desplazamientos

obtenidos son inferiores a los que se obtendrían en caso de total aplicación de las solicitaciones.

La evolución de ΣM_{stage} con los ángulos que causan el colapso de la pantalla (los que no se llega a convergencia) forma una línea en general bien definida que pasa por el ángulo estricto. Esta medida de verificación junto con el resto de comprobaciones constituye la herramienta de decisión para la elección del ángulo estricto de equilibrio.

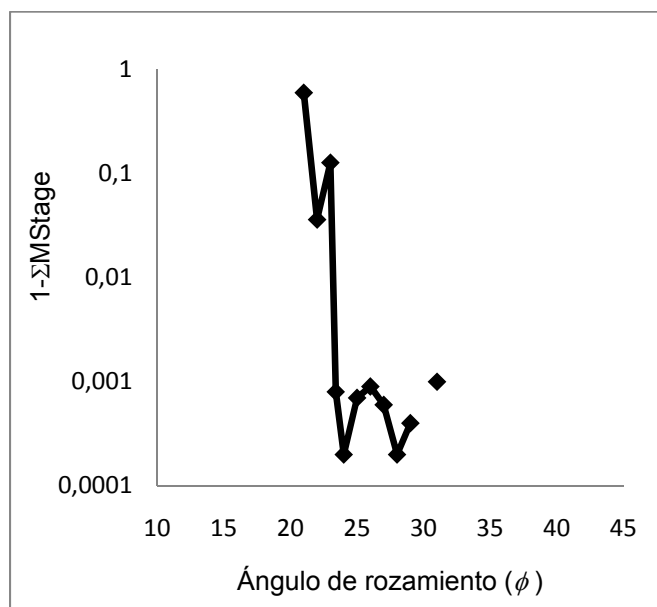


Figura 4.2 Error en ΣM_{stage} en función del ángulo de rozamiento utilizado en el cálculo. [$\phi - (1 - \Sigma M_{stage})$]. Alrededor de 24° empieza a observarse la tendencia de la evolución hacia no convergencia.

4.6 Análisis de los resultados

En este capítulo se desarrolla con detalle el caso de pantalla en voladizo con alzado y clava inicial de 5 m. Adicionalmente se mencionan los efectos observados de cohesión y rigidez aunque no pertenecen a este caso.

4.6.1 Estado de rotura

La rotura del terreno se produce cuando las tensiones alcanzan el criterio de rotura de Mohr-Coulomb (ec. 2.5). En la figura 4.3 se representa, por sombreado, las deformaciones de corte con el ángulo estricto (previo a rotura) correspondiente a un alzado y una clava de 5 m.

En la figura 4.3 puede diferenciarse las deformaciones debidas a un estado activo en el trasdós y a un estado pasivo en el intradós. Según el rango de sombras, mientras la parte superior del intradós (zona roja) tiene un valor aproximado del 2% de deformación, casi todo el estado activo se encuentra con un valor de deformación alrededor de 0,8%. Como es sabido, la movilización del estado pasivo requiere deformaciones mayores a las del estado activo.

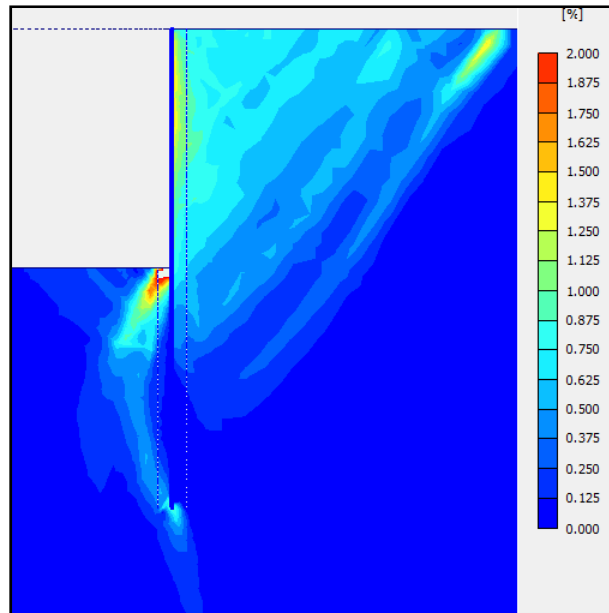


Figura 4.3 Deformaciones de corte y rango de valores según la escala de colores.

Si comparamos la figura 4.3 con las líneas de rotura teóricas de Rankine se obtiene la figura 4.4. En esta figura puede verse que las líneas características de rotura de Rankine (líneas rojas) no coinciden de forma exacta con las zonas de mayor deformación de corte, en concreto en la mitad inferior de la clava, pero la aproximación puede considerarse buena. El análisis de estas diferencias puede verse en apartados posteriores.

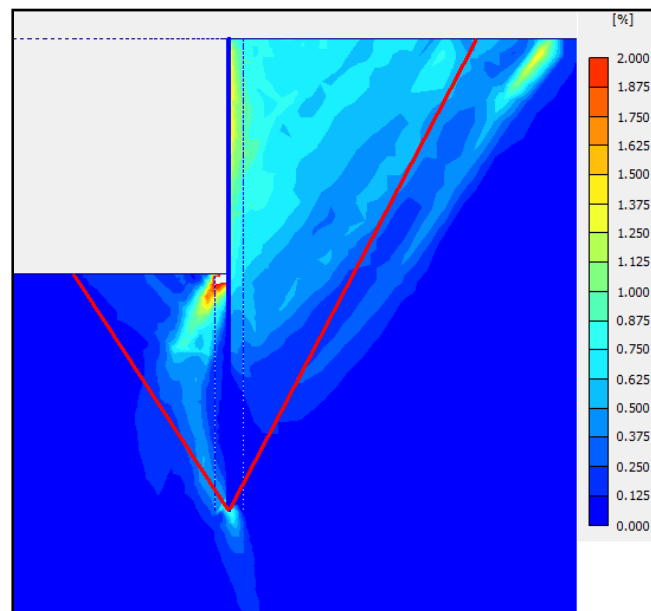


Figura 4.4 Deformaciones de corte y líneas características de rotura de Rankine.

Las tensiones principales muestran claras diferencias entre la solución numérica y los métodos clásicos sobretodo en el trasdós cerca del fondo de la clava. Según la teoría clásica, en esta zona se debería tener un estado cercano al estado pasivo (la tensión horizontal es la principal mayor). No obstante, los resultados numéricos (figura 4.5) muestran que a pesar de que se produce un cierto giro de las tensiones principales todavía están relativamente lejos del estado pasivo. El segmento mayor de las cruces

de tensiones debería situarse en una posición más horizontal y no es así como sucede. Sin embargo, los métodos clásicos suponen plasticidad perfecta y que las direcciones principales son vertical y horizontal. Ninguna de estas hipótesis es completamente válida en todas las zonas del dominio.

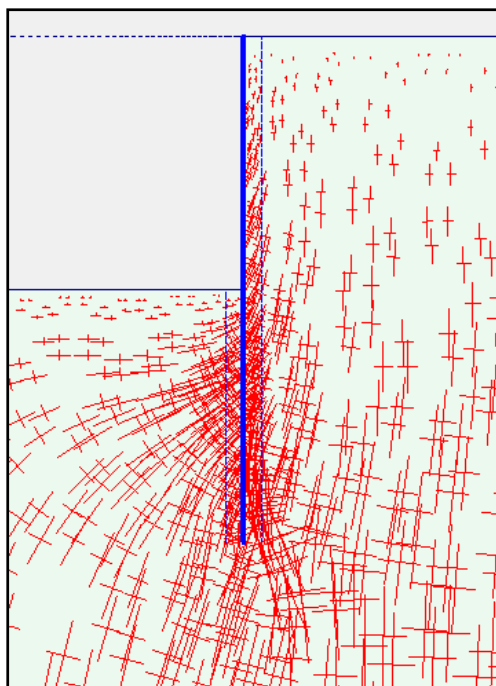


Figura 4.5 Tensiones principales representadas con cruces. La línea de mayor longitud representa la dirección de la tensión principal mayor

En el caso de empuje activo sobre el resto del alzado en el trasdós, la tensión principal mayor corresponde bastante bien con la vertical mientras que en el intradós la tensión principal mayor corresponde bastante bien con la horizontal en concordancia con la teoría clásica.

4.6.2 Análisis tensional

En este apartado se utiliza el programa de representación de tensiones desarrollado y explicado en el capítulo anterior, apartado 3.6 “Post-proceso de los resultados”. Se recuerda que nuevamente el análisis se hace sobre la pantalla en voladizo de 5m. de alzado y 5m. de clava inicial como caso representativo.

En general puede decirse que el estado tensional de los empujes sobre la pantalla mediante métodos numéricos se ajusta bastante bien a las predicciones de los métodos clásicos. La similitud disminuye en el estado pasivo del intradós, donde se sitúa por encima del analítico, y de los estados elásticos de transición, en especial del estado pasivo del intradós hasta el pasivo del trasdós. A continuación se presentaran algunos ejemplos.

En algunos casos analizados se ha hecho el seguimiento de las tensiones enfocado desde dos perspectivas:

- i. Evolución de las tensiones para diferentes valores del ángulo de rozamiento con la excavación del intradós completada.

- ii. Evolución de las tensiones para el ángulo de rotura según se avanza en las fases de excavación.

Evolución por ángulos

La figura 4.6 muestra la evolución del desplazamiento de la pantalla en relación al ángulo de rozamiento interno. Para la clava inicial de 5 m (figura 4.6.a) el colapso del conjunto se produce para un ángulo de aproximadamente $26,5^\circ$ mientras para la clava incrementada un 20% (6m.) el colapso sucede con un ángulo de aproximadamente $23,4^\circ$ (figura 4.6.b). La evolución del desplazamiento es similar a medida que el ángulo de rozamiento disminuye, aunque con magnitudes diferentes.

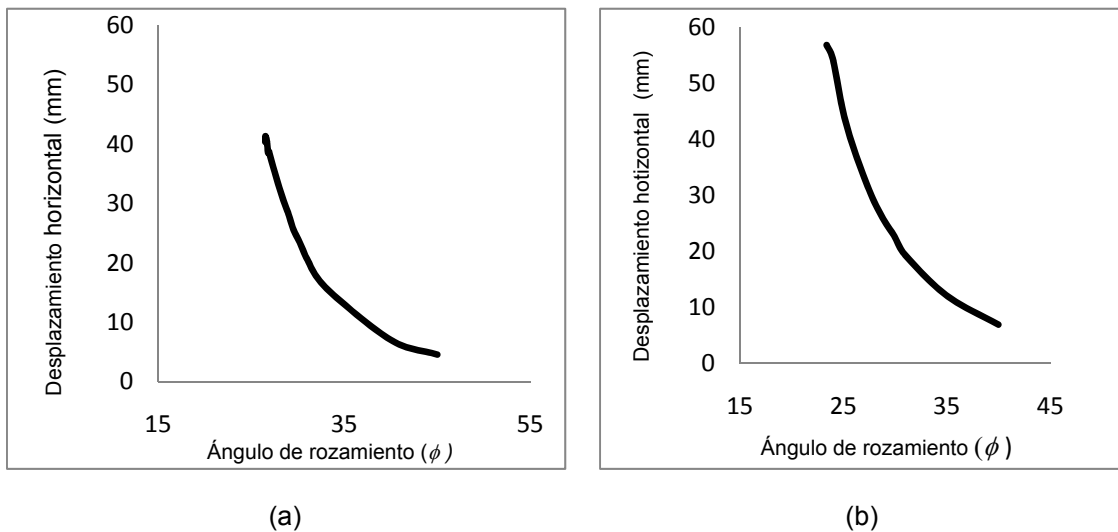


Figura 4.6 Relación ángulo-desplazamiento (en coronación). Pantalla en voladizo con 5m. de alzado. (a) Clava inicial de 5 m (b) Clava aumentada un 20%, 6 m.

El análisis tensional se desarrolla en base a tres aspectos diferenciados:

- i. Análisis de la ley neta numérica de empujes del trasdós en referencia al estado activo y pasivo analítico.
- ii. Análisis de la ley neta numérica de empujes del intradós respecto los estados activo y pasivo analítico.
- iii. Ley neta de empujes numérica a lo largo de la pantalla.

Se adjuntan las figuras 4.7 a 4.11 correspondientes a las leyes de tensiones para la pantalla de 5 m de alzado y 5 m de clava inicial, que sirven de referencia a las observaciones para los ángulos de 45° , 40° , 30° , 28° y $26,52^\circ$. Éste último previo al colapso del conjunto. A la cota 30 se encuentra la superficie del trasdós y a la cota 25 se sitúa el fondo de la excavación.

En Plaxis, la interacción suelo-pantalla puede requerir una atención especial en ciertos puntos como en el caso del extremo inferior de la pantalla, debido al cambio brusco de las condiciones de contorno que produce puntas elevadas de tensiones. Este efecto se compensa en parte con la colocación de la interfase alrededor de la pantalla pero aún así, en el pie de clava se originan a menudo resultados en tensiones difíciles de interpretar con mucha dispersión de los valores obtenidos. De ahí la complejidad de concretar el comportamiento de este punto.

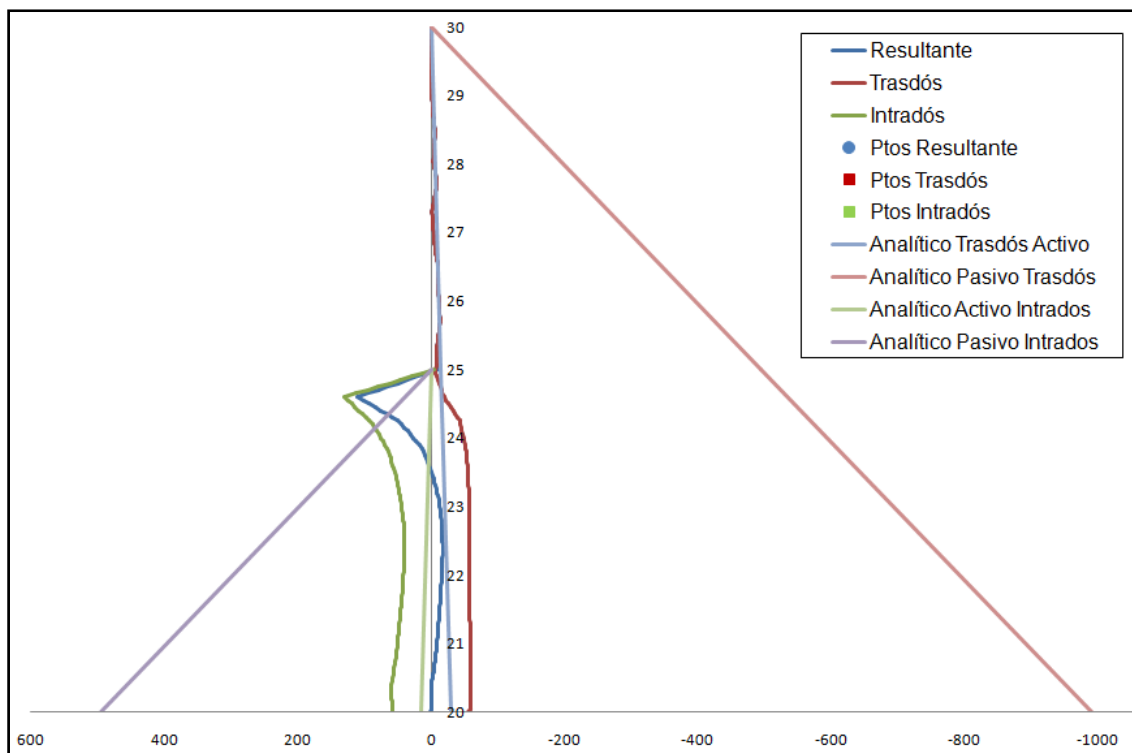


Figura 4.7 Ley de tensiones. Alzado y clava de 5 m. Ángulo de 45°

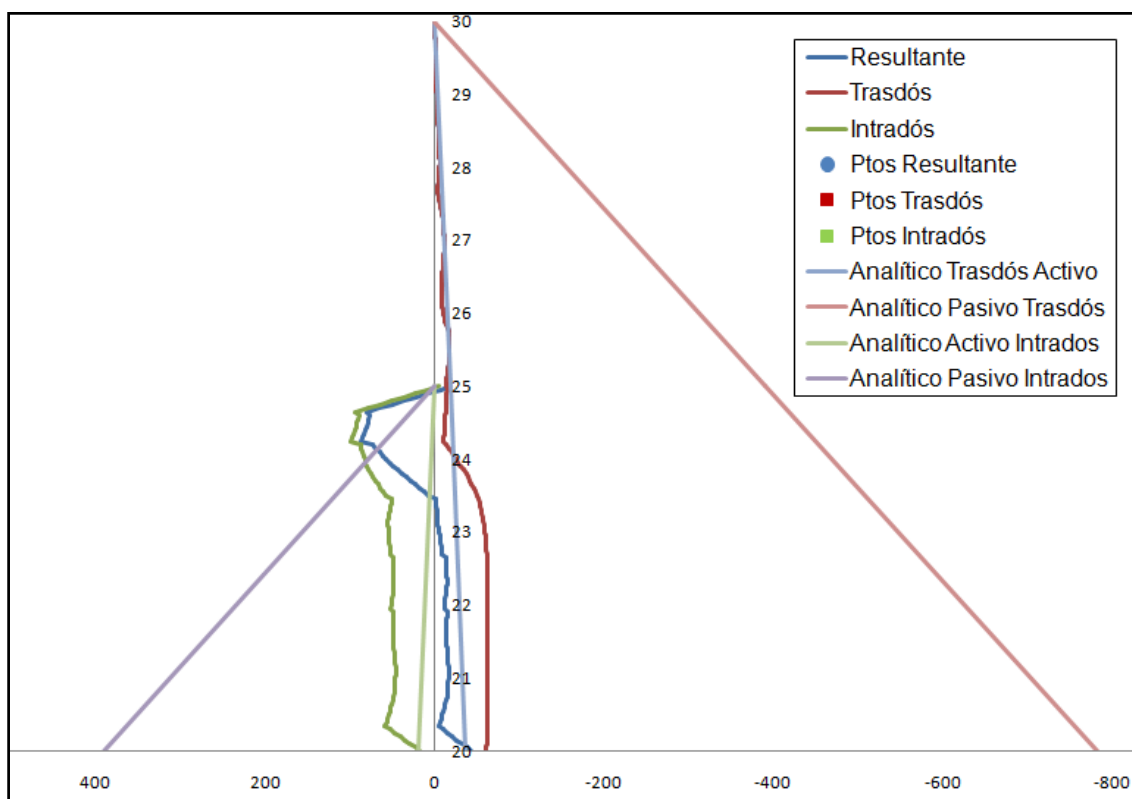


Figura 4.8 Ley de tensiones. Alzado y clava de 5 m. Ángulo de 40°

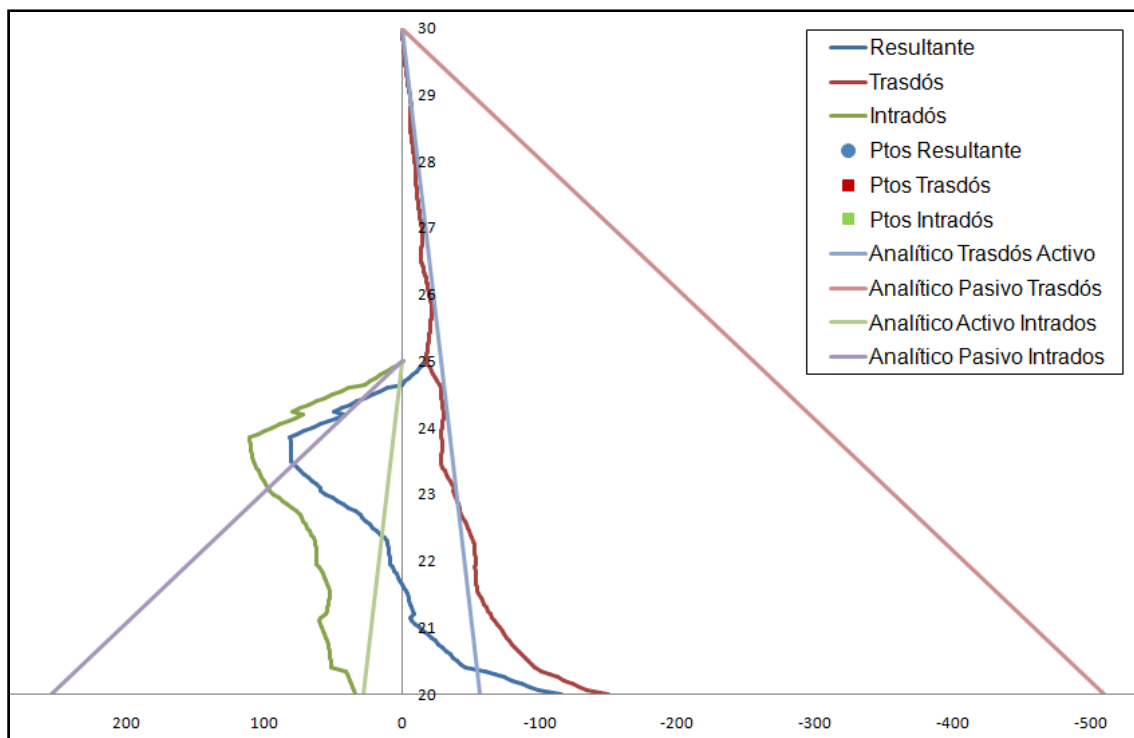


Figura 4.9 Ley de tensiones. Alzado y clava de 5 m. Ángulo de 30°

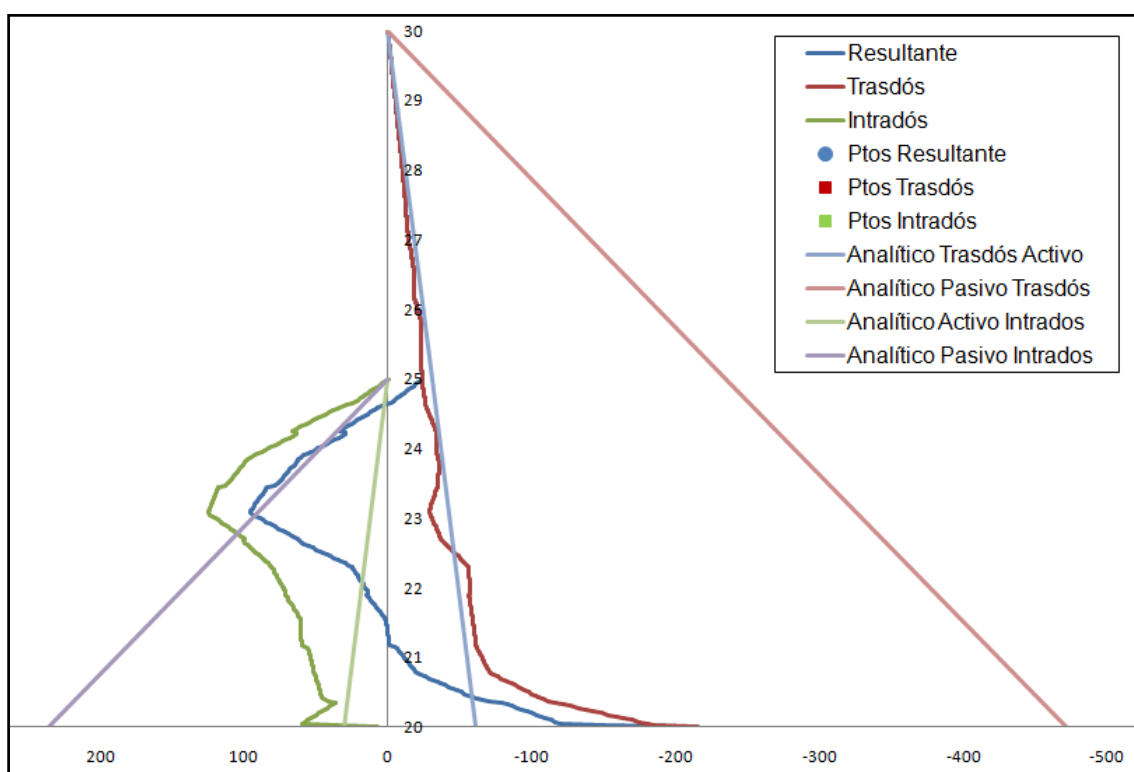


Figura 4.10 Ley de tensiones. Alzado y clava de 5 m. Ángulo de 28°

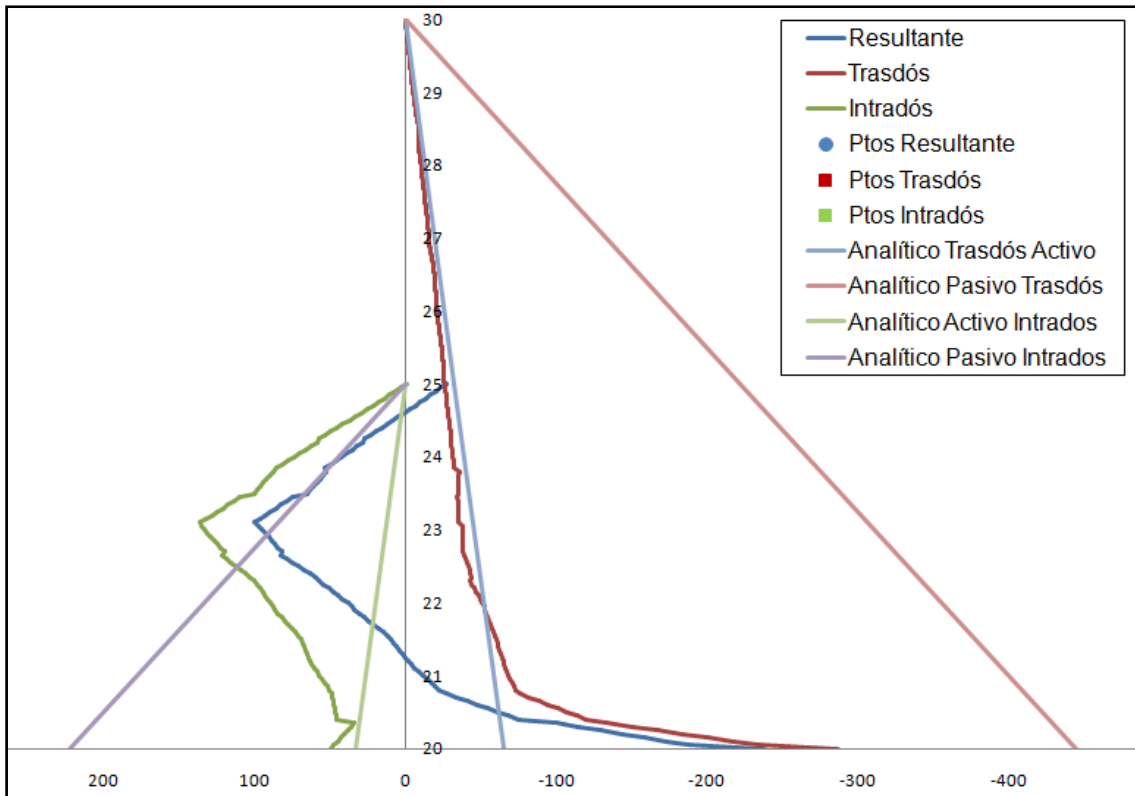


Figura 4.11 Ley de tensiones. Alzado y clava de 5 m. Ángulo de $26,5^\circ$ (previo a rotura)

a) Tensiones en el trasdós

La ley de tensiones neta proporcionada por Plaxis en la zona del trasdós correspondiente a la zona de alzado destaca por su constante solape con la ley analítica del estado activo para todos los ángulos. Parece lógico teniendo en cuenta que no actúa ninguna fuerza exterior en este tramo. Incluso para ángulos alejados de la rotura, esta característica se mantiene debido a la poca diferencia existente entre el coeficiente de empuje al reposo y el coeficiente de empuje activo. Se deduce por tanto que el terreno en la zona de alzado en el trasdós rompe desde el primer instante haciendo entrar en carga a la pantalla.

En la ley de tensiones en la zona de clava se puede apreciar que la tendencia cambia respecto la zona de alzado. Para ángulos alejados de la rotura tales como 45° o 40° (figuras 4.7 y 4.8), el empuje se acerca al estado activo pero permanece ligeramente por encima de él. Se deduce por tanto que dado que el conjunto es muy estable con estos ángulos de rozamiento, el terreno mantiene la estabilidad con tendencia al estado de reposo en el que la pantalla apenas interviene. No obstante, a medida que el ángulo de rozamiento disminuye y se acerca a 30° y 28° (figuras 4.9 y 4.10), las tensiones en la zona inferior de la clava aumentan claramente a partir de la cota 21 con una marcada tendencia hacia el estado pasivo analítico tal y como predicen los métodos clásicos. Para el ángulo de rotura considerado de $26,52^\circ$ (figura 4.11) este efecto aumenta notablemente. Al acercarnos al equilibrio límite, los empujes que actúan en la pantalla aumentan y se desarrolla el empuje pasivo en el pie de clava para poder alcanzar el equilibrio.

b) Tensiones en el intradós

En el intradós de la pantalla las tensiones son opuestas. Rápidamente el estado tensional de la parte superficial aumenta incluso por encima del estado pasivo analítico. La existencia de un estado tridimensional de tensiones en Plaxis (tensión perpendicular al plano del modelo geométrico) aumenta el confinamiento del terreno, por lo que se genera más resistencia a la deformación que se traduce en un empuje pasivo mayor al calculado analíticamente. En este sentido las sobrepresiones por encima del estado pasivo analítico son mayores para ángulos alejados de rotura que para los cercanos. El estado pasivo para ángulos altos está acotado a una zona muy superficial mientras para ángulos bajos alcanza mayores profundidades. Eso indica que en los primeros casos (ángulos altos), es necesario movilizar menor porción de terreno para contrarrestar las tensiones de compresión de la pantalla contra el terreno, dada su rigidez y las bajas tensiones que genera el empuje activo en el trasdós.

En la sucesiva disminución del ángulo de rozamiento, la profundidad que alcanza el estado pasivo aumenta junto con el desarrollo del estado activo en el pie de clava. En consecuencia, sólo cuando el empuje pasivo empieza a moverse en el trasdós el empuje activo lo hace en el intradós.

c) Ley de tensiones neta

Se trata de la suma de las dos leyes anteriores. En este caso puede verse el efecto de la elasticidad de la pantalla en la transición de tensiones desde el final del estado pasivo en el intradós hasta la zona en que se inicia el estado pasivo en el trasdós (figura 4.11). El punto donde las tensiones de corte de la pantalla cambian de signo determina el punto de giro, que aproximadamente se sitúa por encima de la predicción que establece los métodos clásicos. Así se observa que la rigidez de la pantalla, que no es tenida en cuenta en los métodos clásicos, influye sobre la distribución de tensiones aumentando la cota en donde se produce el giro.

Evolución por etapas en rotura

De igual forma que se ha analizado las tensiones en relación al ángulo de rozamiento con la excavación del alzado, también se ha estudiado la evolución de las tensiones simulando el proceso de excavación, fase a fase, para el ángulo de rotura determinado en el caso de pantalla de 5 m de alzado y 5,5 m de clava.

Este apartado no se desglosa en leyes de tensiones para trasdós, intradós y netas ya que muchos conceptos explicados en la evolución por ángulos son válidos para este análisis.

En la figura 4.12, a la cota de excavación más superficial de 1m de profundidad se puede decir que el efecto es similar al observado en ángulos alejados de rotura. La ley neta de empujes sobre el trasdós se ajusta a la ley de empujes activos mientras el empuje pasivo en el intradós se limita a una zona muy superficial. Nuevamente son las partes superficiales con menor resistencia las que se acercan a los estados límite analíticos.

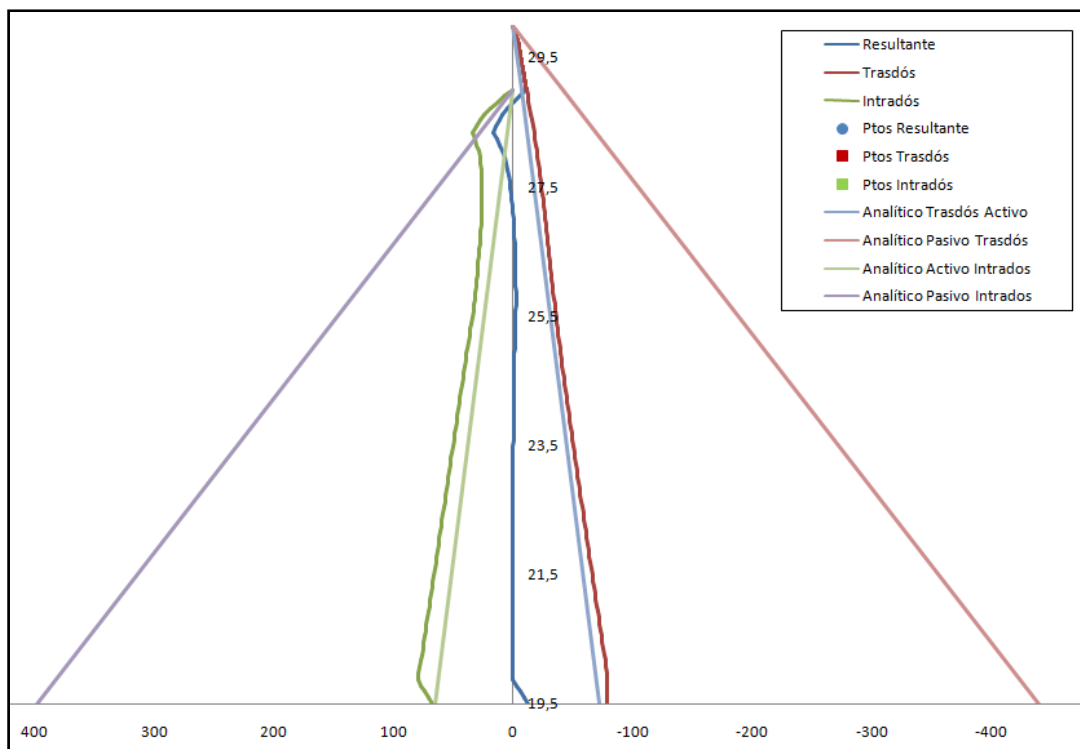


Figura 4.12 Ley de tensiones. Alzado de 5 m. y clava de 5,5 m. Excavación de 1 m. Ángulo de 25° (previo a rotura)

Con una excavación de 3m se aprecia un cambio en la evolución de las tensiones (figura 4.13). El estado pasivo en el intradós se moviliza a mayor profundidad pero todavía no se han movilizad el estado activo y pasivo a cada lado del pie de clava ya que la ley de empujes neta se mantiene aproximadamente en un valor de cero.

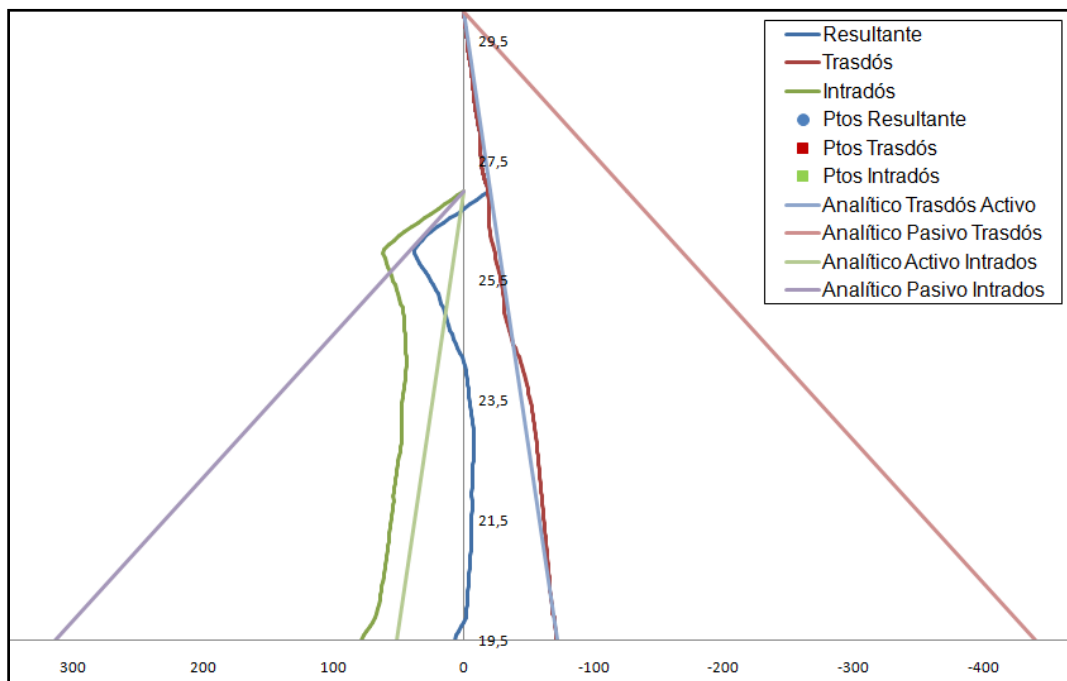


Figura 4.13 Ley de tensiones. Alzado de 5 m. y clava de 5,5 m. Excavación de 3 m. Ángulo de 25° (previo a rotura)

En el ejemplo con 5 m de excavación (figura 4.14) se puede observar lo que ya se ha comentado para la evolución de las tensiones con los diferentes ángulos: marcada tendencia hacia el estado pasivo en el pie de pantalla del trasdós, desarrollo máximo del estado pasivo en el intradós y transición de un estado a otro en el pie de la clava. Destaca el brusco cambio del estado tensional producido por una diferencia en la excavación de sólo dos metros respecto la excavación de 3 m (figura 4.13). En consecuencia, sólo en las últimas fases de excavación es donde se alcanza el estado cercano de rotura y donde más interviene el correcto diseño de la pantalla.

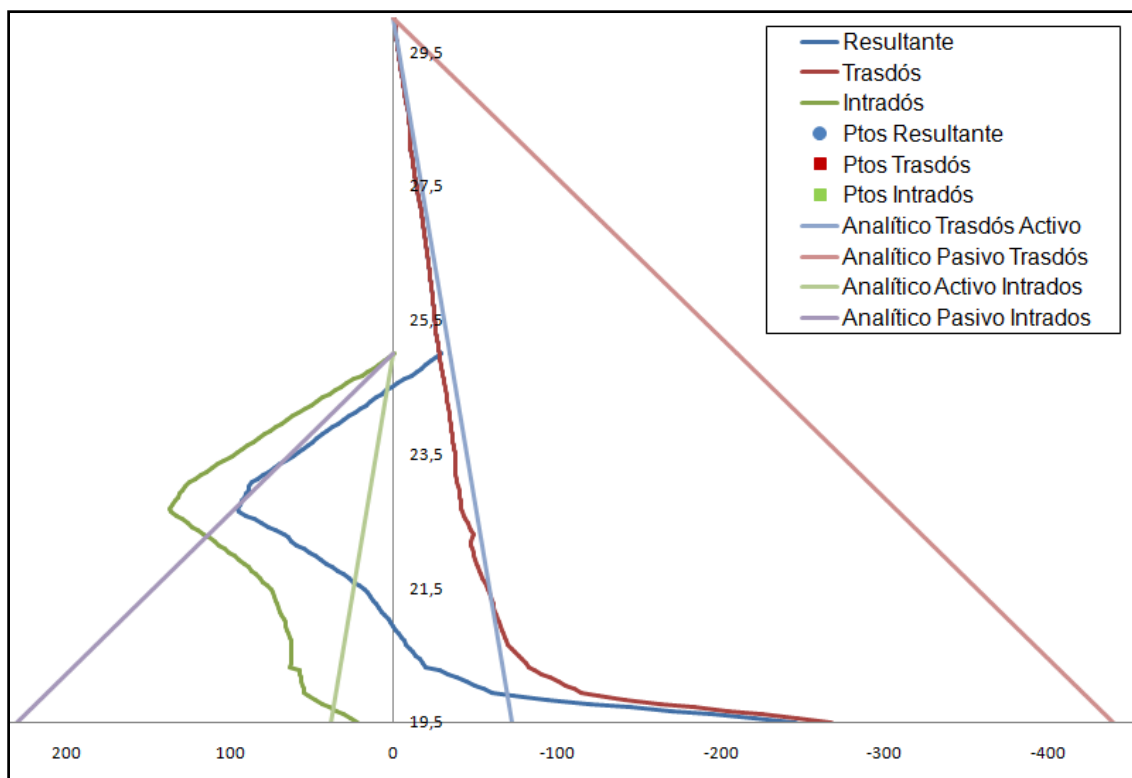


Figura 4.14 Ley de tensiones. Alzado de 5 m. y clava de 5,5 m. Excavación de 5 m. Ángulo de 25° (previo a rotura)

4.6.3 Cohesión

La cohesión es un parámetro resistente que a menudo se desprecia en los cálculos geotécnicos de diseño debido a su variabilidad y a no poder asegurar su existencia a lo largo del tiempo, permitiendo en todo caso una seguridad adicional.

En la tabla 4.1 se indica la existencia del análisis de un caso en presencia de cohesión. Su estudio ha sido enfocado desde dos perspectivas:

- Efecto de la cohesión en el factor de seguridad al permitir ángulos de rozamiento menores para una misma pantalla en presencia de un valor de cohesión de 10 kPa (caso Vh5d7,5c10).
- Evolución de la relación entre la variación de ϕ y la cohesión, c , para mantener la estabilidad de una pantalla de 5 m de alzado y 7,5 m de clava (9 m sumando el 20%).

Hay que tener presente que considerar un solo caso puede no ser del todo representativo de todas las situaciones ni de otros casos. Sin embargo permite

observar, sin descartar análisis más profundos sobre el tema, la elevada contribución de la cohesión sobre la estabilidad del conjunto.

Los resultados obtenidos sobre su contribución al factor de seguridad pueden observarse en el apartado 4.7 “Factores de seguridad” donde se detalla la descomposición hecha del factor de seguridad y los valores obtenidos. La relación que mantiene con el ángulo de rozamiento se explica a continuación junto con el procedimiento utilizado.

La estrategia utilizada para tener en cuenta este efecto se corresponde a la llevada a cabo con el resto de casos: construcción por etapas, relación $[\phi - U_x]$ y relación $[\phi - (1 - \Sigma M \text{Stage})]$. La única variación a destacar en la metodología es añadir un parámetro más al estudio, donde para cada ángulo se ha llevado a cabo un análisis con diversos valores de c dando como resultado una gráfica como la mostrada en la figura 4.15.

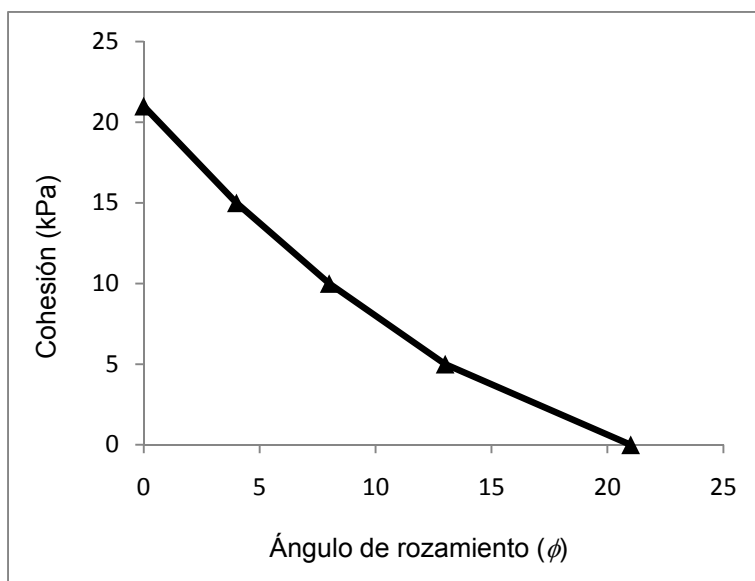


Figura 4.15 Relación ángulo de rozamiento-cohesión

La figura 4.15 muestra la relación entre la cohesión y el ángulo de rozamiento para una pantalla de 5 m de alzado y 7,5 m de clava inicial. El ángulo de rozamiento que proporciona equilibrio, sin la contribución de la cohesión, se sitúa alrededor de 21° . A medida que disminuye el ángulo de rozamiento, la estabilidad evoluciona manteniendo una relación con tendencia aproximadamente lineal. Para un valor nulo del ángulo de rozamiento, la cohesión alcanza un valor aproximado de 21 kPa. No se puede asegurar que la relación para mantener la estabilidad tenga siempre la misma forma, por lo que puede ser objeto de estudio para otros posibles análisis que escapan al contenido de la tesina.

Despreciar la cohesión en el diseño de pantallas disminuye la probabilidad de colapso ya que, tal y como se muestra en la figura 4.15, puede llegar a contribuir en gran medida a la estabilidad del conjunto. No obstante, se recuerda que tener en cuenta este parámetro puede ser peligroso debido a los cambios de magnitud que puede sufrir en el tiempo según las condiciones en que se encuentre el terreno.

4.7 Factores de seguridad

De los factores de seguridad descritos en el apartado 4.3 “Descripción del factor de seguridad”, se ha hecho hincapié en el definido por los parámetros (ángulo de rozamiento), considerado el más realista.

El presente apartado resume el resultado de los casos llevados a cabo en los que, mediante el factor de seguridad, se refleja las diferencias entre ambos métodos de cálculo: clásicos y numérico.

En primer lugar se describe los diferentes factores de seguridad calculados: criterio adoptado y significado. En el segundo apartado se muestra el valor de cada factor de seguridad descrito.

4.7.1 Descomposición del Factor de Seguridad

La idea de establecer un factor de seguridad más realista debe permitir un mecanismo de comparación que conduzca de los resultados obtenidos por métodos clásicos a los obtenidos por métodos numéricos. Esto se consigue a través de la descomposición del factor de seguridad en sucesivos sub-factores multiplicativos que permiten valorar cada efecto por separado.

En primer lugar, tal y como se muestra en la tabla 4.4, se determinan 4 ángulos de rotura por cada método de cálculo analítico para pantallas en voladizo.

Para el método de cálculo completo, que reproduce la distribución de empujes a lo largo de la pantalla, se obtienen los siguientes ángulos:

- ϕ_c y $\phi_{c_{20\%}}$: para la clava inicial y clava incrementada un 20%.
- $\phi_{c.red}$ y $\phi_{c.red_{20\%}}$: para la clava inicial y clava incrementada un 20%. En ambos casos se ha reducido el coeficiente de empuje pasivo a dos tercios de su valor original.

En el caso del método de cálculo simplificado, que sustituye por una fuerza ficticia en el pie de clava los empujes producidos por debajo del punto de giro, se obtienen los siguientes ángulos:

- ϕ_s y $\phi_{s_{20\%}}$: para la clava inicial y clava incrementada un 20%.
- $\phi_{s.red}$ y $\phi_{s.red_{20\%}}$: para la clava inicial y clava incrementada un 20%. En ambos casos se ha reducido el coeficiente de empuje pasivo a dos tercios de su valor original.

Con los dos métodos de cálculo, si la clava se incrementa un 20%, la ley de empujes pasivos (principal fuerza estabilizadora) aumenta en mayor proporción que la ley de empujes activos (principal fuerza desestabilizadora). En consecuencia, la magnitud de los momentos estabilizadores crece rápidamente y el equilibrio límite se alcanza con un ángulo de rozamiento del terreno menor que en el caso sin incremento de clava.

$$\tan \phi_{clava\ inicial} > \tan \phi_{20\%}$$

Por otra parte, mediante Plaxis se obtienen dos ángulos de rozamiento:

- ϕ_{plaxis} : para la clava inicial.
- $\phi_{plaxis\ 20\%}$: para la clava incrementada un 20%.

La tabla 4.4 muestra el valor de todos los ángulos de rozamiento obtenidos.

Tabla 4.4 Ángulos de rotura para clava inicial y aumentada 20%. Resultados según métodos clásicos y Plaxis.

CASOS			ÁNGULO DE ROTURA (grados)				
Nombre	h	d	ϕ_s	ϕ_c	$\phi_{s.red}$	$\phi_{c.red}$	ϕ_{plaxis}
Vh3d3	3	3	28,53	30,08	33,5	35	25
		3,6	25,19	26,68	30,3	31,7	22
Vh3d4,5	3	4,5	21,43	22,8	26,73	28	18
		5,4	18,65	19,9	24,1	25,3	16
Vh5d5	5	5	28,53	30,08	33,503	35	26,5
		6	25,19	26,68	30,3	31,7	23,4
Vh5d7,5	5	7,5	21,4	22,8	26,7	28	21
		9	18,6	19,9	24,1	25,3	18
Vh5d7,5c10	5	7,5	11,9	-	16,6	-	8
		9	10,3	-	15,4	-	7
Vh5d7,5-Q	5	7,5	26,5	-	31,5	-	29
		9	23,5	-	28,62	-	24

Si se observa la tabla 4.4, puede apreciarse que:

$$\tan \phi_{c.red} > \tan \phi_{s.red} > \tan \phi_c > \tan \phi_s > \tan \phi_{plaxis}$$

En base a los ángulos de rozamiento obtenidos por cada método de cálculo puede establecerse diferentes factores de seguridad. A continuación se indican los calculados en la tesina:

- FS1 a FS5 (tabla 4.5): es el cociente entre el ángulo de rozamiento, calculado con el mismo método (completo, simplificado o Plaxis), que cumple el equilibrio límite con la clava inicial y con un incremento de la clava de un 20%.

$$FS = \frac{\tan \phi_{clava\ inicial}}{\tan \phi_{20\%}}$$

Este factor de seguridad compara los resultados obtenidos mediante el método de dimensionamiento en equilibrio y los resultados obtenidos al aumentar la clava en un 20%. Da una idea de la seguridad que introduce aumentar la clava en un 20%.

- FS6 a FS9 (tabla 4.6): indican el factor de seguridad inducido por los métodos clásicos. Se trata del factor de seguridad real acorde con el siguiente procedimiento:
 - Para un ángulo real del terreno, se diseña la pantalla con uno de los métodos clásicos.
 - Al aumentar la clava un 20%, y tomando los métodos numéricos como el valor más próximo a la realidad, la pantalla se aleja todavía más de la inestabilidad.

$$FS = \frac{\tan \phi'_{clava\ inicial}}{\tan \phi'_{plaxis\ clava\ inicial}} \times \frac{\tan \phi'_{plaxis\ clava\ inicial}}{\tan \phi'_{plaxis\ 20\%}}$$

Este factor de seguridad compara los resultados obtenidos mediante el método de dimensionamiento en equilibrio y los resultados numéricos basados en una geometría con la clava aumentada en un 20%, y terreno con las mismas propiedades. Da una idea de la seguridad que introducen los métodos analíticos de dimensionamiento.

- FS10 y FS11 (tabla 4.7): si al factor de seguridad anterior se le añade el efecto de la cohesión se obtiene:

$$FS = \frac{\tan \phi'_{clava\ inicial\ sin\ cohesión}}{\tan \phi'_{clava\ inicial\ con\ cohesión}} \times \frac{\tan \phi'_{clava\ inicial\ con\ cohesión}}{\tan \phi'_{plaxis\ cohesión}} \times \frac{\tan \phi'_{plaxis\ cohesión}}{\tan \phi'_{plaxis\ cohesión\ 20\%}}$$

Este factor de seguridad compara los resultados obtenidos mediante el método de dimensionamiento en equilibrio (despreciando la cohesión) y los resultados numéricos basados en una geometría con la clava aumentada en un 20%, y terreno con las mismas propiedades (incluyendo la cohesión). Da una idea de la seguridad que introducen los métodos analíticos de dimensionamiento si además se desprecia la cohesión.

4.7.2 Factores de seguridad obtenidos

La aplicación de los factores de seguridad descritos proporciona, en función de los ángulos obtenidos por cada método de cálculo (tabla 4.4), los resultados mostrados en las tablas 4.5 a 4.7.

La tabla 4.5 muestra los valores del factor de seguridad obtenido a partir de cada método de cálculo (simplificado, completo y Plaxis) al aumentar la clava inicial un 20%. Los valores FS1 y FS2 correspondientes a los métodos clásicos (simplificado y completo) sin reducción del coeficiente de empuje pasivo, mantienen en todos los casos una relación de 1,15 y 1,16. Para los casos con reducción de empuje pasivo, FS3 y FS4, la relación se mantiene alrededor de 1,12 y 1,13. Los valores extraídos del análisis con Plaxis presentan mayor variabilidad, que es lógico tratándose de elementos finitos, pero se mantienen próximos a los resultados obtenidos por métodos clásicos.

Los métodos clásicos con reducción del empuje pasivo proporcionan ángulos de rozamiento mayores a los que se obtienen sin reducción de empuje pasivo, pero la diferencia entre el ángulo de rozamiento para la clava inicial y la clava incrementada es aproximadamente igual al caso con reducción de empuje pasivo. Para los factores de seguridad FS1 a FS4 de la tabla 4.5, la diferencia del ángulo de rozamiento entre la clava inicial y la clava incrementada es de aproximadamente 3° (véase tabla 4.4) excepto para el caso con cohesión, donde la diferencia es de aproximadamente de 1,5°.

Debido a que los ángulos obtenidos con reducción del empuje pasivo son mayores a los obtenidos sin la reducción de dicho empuje, los valores de FS3 y FS4 son menores a los de FS1 y FS2 a pesar de que la diferencia entre ángulo de rozamiento para clava inicial e incrementada se mantiene.

Tabla 4.5 Factores de seguridad por efecto de aumentar la longitud de clava en un 20%

CASO	FACTORES DE SEGURIDAD				
	FS1 $\left(\frac{\tan \phi_s}{\tan \phi_{s20\%}} \right)$	FS2 $\left(\frac{\tan \phi_c}{\tan \phi_{c20\%}} \right)$	FS3 $\left(\frac{\tan \phi_{s.red}}{\tan \phi_{s.red20\%}} \right)$	FS4 $\left(\frac{\tan \phi_{c.red}}{\tan \phi_{c.red20\%}} \right)$	FS5 $\left(\frac{\tan \phi_{plaxis}}{\tan \phi_{plaxis20\%}} \right)$
Vh3d3	1,16	1,15	1,13	1,13	1,15
Vh3d4,5	1,16	1,16	1,13	1,12	1,13
Vh5d5	1,16	1,15	1,13	1,13	1,15
Vh5d7,5	1,16	1,16	1,12	1,12	1,18
Vh5d7,5c10	1,16	-	1,12	-	1,14
Vh5d7,5-Q	1,15	-	1,12	-	1,24

En la tabla 4.6 se muestran los valores del factor de seguridad obtenido si se compara la tangente del ángulo de rozamiento de la clava inicial calculado con métodos clásicos y el ángulo de rozamiento, considerado más real, obtenido por Plaxis al aumentar la clava un 20%.

Para un mismo ángulo, el método simplificado proporciona menos clava en comparación al método completo, ya que considera que no hay suficiente profundidad para que se desarrollen los empujes invertidos inferiores (a diferencia del método completo en el que sí se desarrollan). De este modo, para una misma clava, el ángulo de rozamiento proporcionado por el método simplificado es menor que el obtenido por el método completo. Sucede lo mismo si se tiene en cuenta la reducción del empuje pasivo. Por otra parte, Plaxis no tiene en cuenta las hipótesis conservadoras de los métodos clásicos y por eso el equilibrio límite se alcanza con un ángulo de rozamiento menor al calculado por métodos clásicos. En consecuencia, el factor de seguridad es creciente de FS6 hacia FS9 para cada caso.

Un valor destacado es el obtenido en el caso con presencia de cohesión, que sitúa el factor de seguridad por encima de la media. A pesar de que la diferencia entre el ángulo de rozamiento calculado con el método simplificado para la clava inicial y el ángulo de rozamiento con Plaxis para la clava incrementada en general es similar a la del resto de casos, el cociente entre las tangentes de estos ángulos es mayor al tratarse de valores bajos del ángulo de rozamiento.

Tabla 4.6 Factores de seguridad del método de dimensionamiento incluyendo aumento de la clava en un 20% una vez determinada por equilibrio

CASO	FACTORES DE SEGURIDAD			
	FS6 $\left(\frac{\tan \phi_s}{\tan \phi_{plaxis_{20\%}}} \right)$	FS7 $\left(\frac{\tan \phi_c}{\tan \phi_{plaxis_{20\%}}} \right)$	FS8 $\left(\frac{\tan \phi_{s.red}}{\tan \phi_{plaxis_{20\%}}} \right)$	FS9 $\left(\frac{\tan \phi_{c.red}}{\tan \phi_{plaxis_{20\%}}} \right)$
Vh3d3	1,35	1,43	1,64	1,73
Vh3d4,5	1,37	1,47	1,76	1,85
Vh5d5	1,26	1,34	1,53	1,62
Vh5d7,5	1,21	1,29	1,55	1,64
Vh5d7,5c10	1,72	-	2,43	-
Vh5d7,5-Q	1,12	-	1,38	-

La tabla 4.7, aunque se trate del resultado de un sólo caso, en base al análisis llevado a cabo y teniendo en cuenta las condiciones en que se ha efectuado (sin presencia de agua y valor de la cohesión constante) indica que despreciar la cohesión puede llegar incluso a duplicar el valor del factor de seguridad. Se trata por tanto de una medida muy conservadora.

Tabla 4.7 Factores de seguridad reales con cohesión. El subíndice “N.C.” significa “Sin cohesión”. “C” significa “con cohesión” y “P.C.” significa “Plaxis con cohesión”

CASO	FACTORES DE SEGURIDAD	
	FS10 $\left(\frac{\tan \phi_{N.C.}}{\tan \phi_C} \times \frac{\tan \phi_C}{\tan \phi_{P.C.}} \times \frac{\tan \phi_{P.C.}}{\tan \phi_{P.C. 20\%}} \right)$	FS11 $\left(\frac{\tan \phi_{s.red N.C.}}{\tan \phi_{s.red C.}} \times \frac{\tan \phi_{s.red C.}}{\tan \phi_{P.C.}} \times \frac{\tan \phi_{P.C.}}{\tan \phi_{P.C. 20\%}} \right)$
Vh5d7,5c10	3,06	3,81

5 ANÁLISIS DE PANTALLAS ANCLADAS A UN NIVEL

5.1 Introducción

En este capítulo se explica con detalle los procesos que han intervenido en la obtención de los resultados por métodos clásicos, numéricos y factores de seguridad para pantallas ancladas a un nivel.

Muchas de las explicaciones para pantallas en voladizo son de aplicación en pantallas ancladas a un nivel y por lo tanto sólo se destacarán las novedades que introducen este tipo de pantallas. Las partes comunes con pantallas en voladizo únicamente se mencionarán.

La forma de proceder es similar a pantallas en voladizo salvo todo lo referido a la fuerza del anclaje y al incremento de variables que proporciona. Se ha analizado una geometría de pantalla con variaciones de la principal variable para la estabilidad del conjunto: la fuerza de anclaje.

5.2 Metodología y casos analizados

En relación al apartado 4.2 “Metodología y casos analizados” para pantallas en voladizo, la presencia del anclaje obliga a introducir variaciones en la metodología según se muestra a continuación:

- I. Elección de alzado y clava inicial (o estricta) de la pantalla.
- II. Dimensionamiento analítico del anclaje. Para ello se han utilizado las “Recomendaciones para el proyecto, construcción y control de anclajes” [8].
- III. Obtención por métodos clásicos del ángulo de rotura para clava estricta y clava aumentada un 20%.
- IV. Simulación de la pantalla y anclaje en Plaxis y realización de los ajustes necesarios para modelar los métodos clásicos en elementos finitos. Obtención del ángulo de rotura para la clava estricta y clava aumentada un 20%.
- V. Análisis de la cohesión.
- VI. Análisis de la fuerza de anclaje.
- VII. Análisis del estado tensional
- VIII. Determinación del factor de seguridad.

Las características geométricas que definen la pantalla son:

- Alzado (h): 10 m.
- Clava inicial (d): 2,5 m.
- Clava incrementada ($d_{20\%}$): 3 m.
- Posición del anclaje: a 2 m de coronación de la pantalla según práctica habitual para el alzado considerado.
- Ángulo del anclaje: 15° respecto la horizontal (sentido horario).
- No se ha considerado nivel freático ni sobrecargas exteriores.

Sobre esta geometría se han llevado a cabo los siguientes análisis con el fin de analizar el efecto de la clava y el efecto de la fuerza de anclaje (Fanc):

Tabla 5.1 Casos analizados en pantallas ancladas a un nivel. La nomenclatura utilizada en la columna “casos” indica: A) pantalla anclada; h) alzado; d) Clava

Caso	Fanclaje	Descripción
Ah10d2,5	100%	Pantalla anclada con alzado de 10 m y clava inicial de 2,5 m. Obtención del ángulo de rotura para una fuerza de anclaje del 100% y 200% del método clásico
	200%	
Ah10d3	100%	Obtención del ángulo de rotura para un incremento de la clava del 20% (d=3). Obtención del ángulo de rotura para una fuerza de anclaje del 100% y 200% del método clásico
	200%	
Ah10d2,5-c	100%	Análisis de la cohesión sobre la pantalla original con un 100% de la Fanc.
Ah10d2,5 $\phi = 37^\circ$	0%	Análisis de la pantalla original con $\phi' = 37^\circ$ para distintas Fanc. aplicadas en un mismo punto y activada según diferentes profundidades de excavación. Representación de la trayectoria de tensiones para las fuerzas marcadas con asterisco (*)
	30%	
	*50%	
	*100%	
	120%	
	*150%	
	*200%	
	*300%	

Todos los gráficos y tablas referidas a estas pantallas se pueden ver en el anejo II “Pantallas ancladas a un nivel”.

5.3 Definición del factor de seguridad

Las definiciones que se aplican para pantallas ancladas son las mismas que se han aplicado para las pantallas en voladizo (sección 4.3). A continuación se muestran los tres factores de seguridad anteriores adaptados a pantallas con un anclaje.

5.3.1 Factor de seguridad en la longitud de clava, F_{CLAVA}

La profundidad de clava inicial, d_0 , se obtiene igualando momentos respecto la posición del anclaje. Posteriormente se incrementa la longitud de clava según:

$$d = d_0 \cdot F_{CLAVA} \quad (\text{ec. 5.1})$$

Donde F_{CLAVA} es el factor de seguridad en la longitud de clava y d_0 es la longitud de clava de proyecto.

De igual modo que en pantallas en voladizo, es habitual que el valor de la longitud de clava se incremente un 20% respecto al obtenido por equilibrio. De este modo se garantiza el desarrollo del contraempuje y se aumenta la fiabilidad de las simplificaciones adoptadas en los métodos analíticos.

Nuevamente, en los casos analizados y acorde con la práctica habitual, este factor de seguridad es de 1,2. Sin embargo, en pantallas ancladas el F_{CLAVA} tampoco proporciona información de cuánto se aleja el nuevo estado tensional del equilibrio límite al aumentar la clava. En consecuencia, no puede deducirse que la estabilidad analizada mediante otras variables tenga el mismo factor de seguridad ya que, por ejemplo, no hay una relación lineal entre longitud de clava y los esfuerzos.

5.3.2 Factor de seguridad en los parámetros, $F_{PARÁMETROS}$

El factor de seguridad en los parámetros coincide con el descrito en el apartado referente a pantallas en voladizo. Afecta a los parámetros geotécnicos del terreno y se define:

$$F_s = \frac{\tan \phi_{real}}{\tan \phi_{rotura}} \quad (\text{ec. 5.2})$$

Donde $\tan \phi_{real}$ y $\tan \phi_{rotura}$ son, respectivamente, la tangente del ángulo de rozamiento para el ángulo de rozamiento real del terreno y la tangente del ángulo que provoca inestabilidad.

En pantallas ancladas se ha empleado el mismo factor de seguridad utilizado en pantallas en voladizo. Se trata de la combinación del F_{CLAVA} y el $F_{PARÁMETROS}$ de modo que se ajuste a la práctica habitual en el diseño de pantallas.

Mientras que a la clava inicial le corresponde un ángulo de rozamiento que cumple el equilibrio límite, al aumentar la clava en un 20% se modifica el estado tensional y en consecuencia el valor del ángulo de rozamiento que cumple el nuevo equilibrio límite. El cociente de la tangente de ambos valores de ángulo de rozamiento (ecuación 4.3) es la base sobre la que se han definido los factores de seguridad calculados en la tesina.

$$F_s = \frac{\tan \phi_{clava\ inicial}}{\tan \phi_{clava\ 20\%}} \quad (\text{ec. 5.3})$$

5.3.3 Factor de seguridad en los momentos, $F_{MOMENTOS}$

Este factor de seguridad afecta al momento flector que se obtiene en el cálculo de la pantalla, a partir del diagrama de empujes resultante. El factor de seguridad $F_{MOMENTOS}$ se define como el cociente entre los momentos estabilizadores y los momentos desestabilizadores, esta vez teniendo en cuenta el momento provocado por la fuerza de anclaje.

$$F_{MOMENTOS} = \frac{M_{estabilizadores}}{M_{desestabilizadores}} \quad (\text{ec. 5.4})$$

El uso de este factor en pantallas no es habitual por no ajustarse al comportamiento de este tipo de estructuras. El factor de seguridad empleado en la tesina se ajusta mejor al cálculo de la probabilidad de colapso de las pantallas ancladas.

5.4 Resolución por métodos clásicos

La resolución ha consistido en invertir la práctica habitual del diseño de pantallas. Es decir, a partir de un alzado y una clava inicial, se ha obtenido el ángulo estricto de rotura mediante el sumatorio de momentos respecto el punto de aplicación del anclaje y mediante el equilibrio de fuerzas horizontales. Posteriormente, se aumenta la clava un 20% y de nuevo se obtiene el ángulo de rozamiento con el que se cumple el equilibrio límite.

Ambas geometrías, clava inicial y aumentada, se introducen en Plaxis y mediante sucesivas disminuciones del ángulo de rozamiento para cada caso, se fuerza la no convergencia de la pantalla modelizada para poder determinar el ángulo real de rotura en el que la pantalla es inestable.

La comparación de los ángulos obtenidos por métodos clásicos y Plaxis, tanto para pantalla con clava inicial y clava incrementada, conduce a la definición de los diferentes factores de seguridad que se desarrollan en apartados posteriores.

5.4.1 Dimensionamiento del anclaje

Siguiendo las indicaciones marcadas por las “Recomendaciones para el proyecto, construcción y control de anclajes” [8] se ha dimensionado el anclaje para los datos de partida de la pantalla. Posteriormente se ha realizado las modificaciones necesarias para poder modelizarlo en Plaxis.

El diseño del anclaje consta del dimensionamiento de la longitud libre y la longitud del bulbo. En el anejo III figuran los cálculos realizados mediante hoja Excel.

Dimensionamiento de la longitud libre

La longitud libre es aquella parte del conjunto del anclaje que une el punto de fijación en la pantalla con la zona resistente (bulbo) situada fuera de la cuña de rotura. La longitud libre depende de la inclinación del anclaje y la cuña de rotura del terreno en el trasdós y su criterio de diseño no está claramente definido en cuanto al ángulo de inclinación y longitud.

La inclinación adoptada en la tesina para el anclaje es de 15° respecto la horizontal en sentido horario, un valor muy utilizado y comprendido entre el rango de 10° a 25° recomendado en [8]. La función del ángulo de inclinación es buscar resistencia al deslizamiento por confinamiento en la zona de bulbo.

La línea que define la cuña de rotura es la correspondiente al estado activo de Rankine (ver ec. 2.7.a y 2.7.b) desde el fondo de la clava. En la práctica constructiva habitual, la longitud libre del anclaje se alarga hasta cortar a una línea paralela a la línea de rotura y situada a una distancia de 0,2 veces el alzado para asegurar que el bulbo se encuentra alejado de la zona de rotura y del plano de deslizamiento de la cuña.

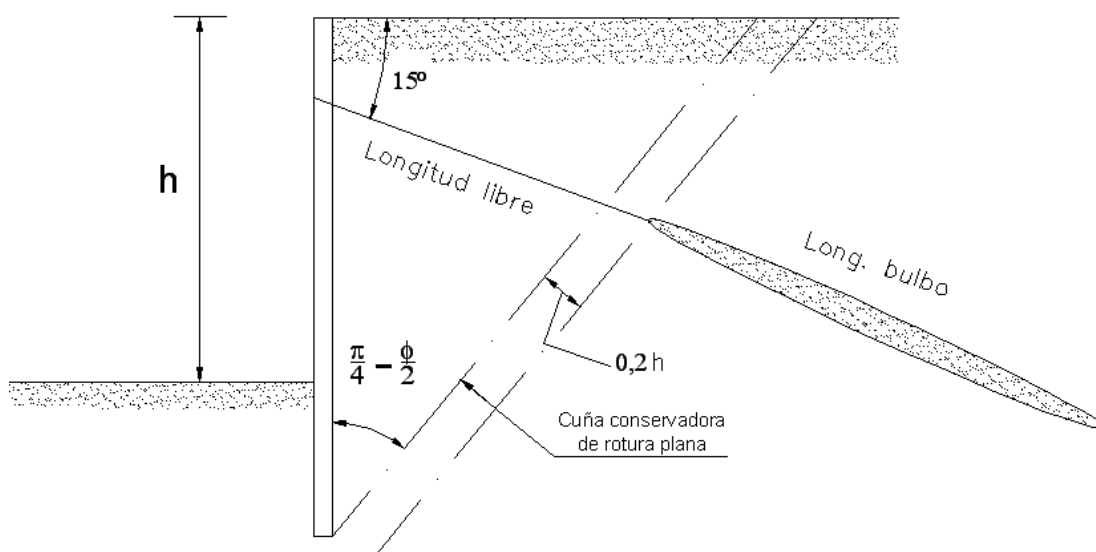


Figura 5.1 Esquema para el diseño del anclaje

Dimensionamiento de la sección del cordón de acero

Se obtiene en función de la fuerza de proyecto que debe soportar. En este caso, el método clásico de soporte libre, en el que existe desplazamiento del pie de pantalla, sin reducción del empuje pasivo en dos tercios del valor original, determina una fuerza de 138 kN/m.

Los datos de partida habituales y orientativos del acero, según la bibliografía consultada [8] [9], son:

- Límite elástico (σ_{elas}) = 1.700 MPa.
- Tensión de rotura (σ_{rot}) = 1.800 MPa.
- Módulo de rigidez (E) = 195.000 MPa.

El valor habitual de la interdistancia entre anclajes de una misma fila oscila entre 1,5 y 2,5 m según las exigencias de la pantalla. Por lo tanto, en la tesina se ha adoptado un valor medio de 2 m para la distancia entre anclajes en sentido perpendicular al plano.

La sección del cable de acero se obtiene mediante equilibrio:

$$S = \frac{F_{anclaje}}{\sigma_{elas.}} = \frac{1,5 \times 1,3 \times 138 \times 2}{1.8} = 299 \text{ mm}^2 \quad (\text{ec. 5.5})$$

Donde los coeficientes 1,5 y 1,3 corresponden a la mayoración de la fuerza de proyecto y a la minoración de la resistencia del acero respectivamente.

Dimensionamiento del bulbo

La longitud del bulbo depende de su diámetro y la resistencia a corte del terreno. La comprobación al deslizamiento del tirante dentro del bulbo no se ha realizado debido a que la modelización del anclaje en Plaxis no permite la visualización de este efecto y carece de sentido su análisis al ser una simulación alejada de la geometría real.

La comprobación al arrancamiento del bulbo se ha llevado a cabo de manera simplificada.

Se ha supuesto un diámetro de vaina de anclaje (entubación por la que se pasa el cable y el mecanismo de anclaje) estándar de 130 mm para el cable dimensionado. Las recomendaciones establecen que el diámetro de perforación será por lo menos 20 mm superior al diámetro de la vaina. Es decir, el diámetro final del bulbo es de 150 mm.

La resistencia al deslizamiento del terreno es ejercida por la resistencia al corte del terreno en el centro del bulbo según el criterio de Mohr. Para simplificar, se ha determinado este valor según la coordenada del extremo de la longitud libre, de este modo se adopta una hipótesis conservadora al considerar menor peso de terreno que en el centro del bulbo. Según la ec. 5.6, la tensión vertical ejercida por el terreno es el peso específico del suelo multiplicado por la altura de terreno situada por encima del extremo de la longitud libre. Si se hace el promedio con la tensión horizontal, que es la tensión vertical multiplicada por el coeficiente de empuje al reposo K_0 , se obtiene:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi = 0 + \frac{1}{2} [\gamma_{suelo} (Z_{superficie} - Z_{fin \text{ long. libre}}) \times (1 + K_0)] \tan(\phi) \quad (\text{ec. 5.6})$$

La longitud del bulbo se obtiene de establecer el equilibrio de fuerzas entre la fuerza de anclaje necesaria afectada por el factor de seguridad 1,5 y el rozamiento ejercido por el bulbo que se obtiene de multiplicar la longitud del bulbo (L) por su perímetro (πd^2) y la resistencia a corte del terreno (τ):

$$L = \frac{1,5 F_{anclaje}}{\pi d^2 \tau} = 13,63 \text{ m} \quad (\text{ec. 5.7})$$

Con la longitud de bulbo ya se pueden obtener todas las coordenadas del anclaje a introducir en Plaxis.

El bulbo dimensionado con una interdistancia de 2 m entre anclajes no permite la convergencia numérica del modelo de pantalla para una carga de pretensado del

100% debido a las diferencias entre el anclaje real y la forma de simularlo en Plaxis así como a la incertidumbre del significado de la fuerza de anclaje según los métodos clásicos. Por lo tanto, como punto de partida para analizar pantallas ancladas a un nivel, se ha reducido a 1,75 m la interdistancia entre anclajes introducida en Plaxis a diferencia de los 2 m considerados en el dimensionamiento. La reducción de esta longitud provoca la rigidización del conjunto pantalla-anclaje y se consigue convergencia para el ángulo de rotura de 37° obtenido por métodos clásicos y un 100% de la fuerza de pretensado en el anclaje. Este hecho permite comparar métodos clásicos y numéricos al situar el modelo en condiciones próximas a las obtenidas con los métodos clásicos.

5.4.2 Resultados obtenidos

Los resultados mostrados según los métodos clásicos se han desglosado para el empuje teórico y reducido $\left(\frac{2}{3} K_p\right)$, según soporte libre y soporte fijo.

Tabla 5.2 Ángulos estrictos y fuerzas de anclaje según métodos clásicos. ()Valor de referencia para la aplicación de diferentes porcentajes de la fuerza de anclaje en los modelos analizados en Plaxis en apartados siguientes (ϕ en grados y F en kN/m)*

	Empuje teórico				Empuje reducido			
	Soporte Libre		Soporte fijo		Soporte Libre		Soporte fijo	
Caso	ϕ	$F_{anclaje}$	ϕ	$F_{anclaje}$	ϕ	$F_{anclaje}$	ϕ	$F_{anclaje}$
Vh10d2,5	37,14	137,83*	38,51	276,87	41,62	116,59	42,91	226,06
Vh10d3	34	164,83	37,02	297,10	38,68	139,93	41,52	242,59

5.5 Resolución con Plaxis y estrategia de cálculo.

Del análisis hecho en Plaxis se pueden diferenciar dos partes:

- En primer lugar se busca el ángulo de rozamiento en el que se produce inestabilidad, pero esta vez, al existir el anclaje, se ha observado cómo varía en función de una fuerza de tesado del 100% y del 200% respecto la fuerza de anclaje de 138 kN/m . Adicionalmente se estudia el efecto de la cohesión.
- En segundo lugar se analiza la fuerza de anclaje desde dos enfoques distintos:
 - Aplicación de diversos porcentajes de la fuerza de anclaje para diferentes profundidades de excavación.
 - Aumento de la fuerza de anclaje hasta rotura.

Obtención del ángulo de rotura

La forma de obtener el ángulo es similar a la utilizada en pantallas en voladizo. Así, las comprobaciones efectuadas para validar el ángulo de rozamiento son las mismas en cuanto a la construcción por etapas y la relación ángulo de rozamiento-desplazamiento. Se ha prescindido de la relación $[\phi - (1 - \Sigma M_{Stage})]$ al no considerarse relevante según la experiencia adquirida en el análisis de pantallas en voladizo.

a) Construcción por etapas

Se ha observado que el comportamiento numérico es regular con la aplicación de carga de anclaje menos en las últimas etapas de excavación donde alcanzar convergencia resulta más difícil. Por lo tanto, para reducir el coste computacional se ha considerado suficiente la simulación de la excavación con cinco fases de excavación de 2 m cada una.

b) Relación ángulo de rozamiento–desplazamiento

La validación del ángulo de rozamiento se verifica de igual modo que pantallas en voladizo. En este sentido, a diferencia de pantallas en voladizo, no sólo se representa el desplazamiento de la cabeza de pantalla, sino también del punto de anclaje y el pie, considerados como puntos de interés.

Obtención de la fuerza de anclaje

La fuerza de anclaje ha sido aplicada con dos objetivos diferentes:

- i. Aplicación de fuerza de anclaje durante la excavación: se ha aplicado diferentes fuerzas de anclaje para la pantalla de 10 m de alzado y 2,5 m de clava. Estas fuerzas se expresan mediante el porcentaje que representan respecto la fuerza de anclaje proporcionada por el método de soporte libre sin reducción del empuje pasivo (138 kN/m). El análisis se ha realizado con un ángulo de 37°, correspondiente al de rotura, aplicando la fuerza de anclaje a 2 m de coronación en diferentes profundidades de excavación: 2, 4 y 5 metros. Este procedimiento ha permitido observar la evolución de la fuerza de anclaje hasta el final de la excavación.
- ii. Una vez finalizada la excavación para cada fuerza de anclaje, se ha incrementado el valor de dicha fuerza hasta llevar el conjunto a rotura. De este modo se determina si en el momento de alcanzar la inestabilidad de la pantalla por sucesivo aumento de la fuerza de anclaje, la fuerza final ejercida por el anclaje es la misma independientemente del momento de la excavación en que se aplica.

5.6 Análisis de los resultados

Seguidamente se presenta y analizan los resultados obtenidos del estudio efectuado para el ángulo de rotura y la fuerza de anclaje.

5.6.1 Estado de rotura

La condición de inestabilidad en Plaxis adquiere especial interés en la visualización de los mecanismos de rotura que producen el colapso del conjunto.

La hipótesis de Rankine predice que si se alcanza un estado límite de rotura del terreno, todos los puntos dentro de la zona se encuentran también en rotura. En efecto, al visualizar los puntos cerca de rotura (sombreado rojo y amarillo en la figura 5.2) puede verse que se sitúan en un área delimitada por la cuña de rotura tanto en el trasdós como en el intradós. Se observa también que la parte inicial del bulbo genera plasticidad en el terreno debido a su elevada tensión (zona de máxima absorción de fuerza por efecto acoplado tensión-deformación) formando una geometría en forma de “v” hacia la superficie. La clava, al ser de menor longitud, tiene permitido mayor desplazamiento, y a diferencia de pantallas en voladizo, se genera una zona de plasticidad por debajo de la pantalla de menor influencia.

El estudio de las líneas cerca de rotura indica que la cuña de rotura es mayor que la cuña de Rankine a ambos lados de la pantalla respecto pantallas en voladizo.

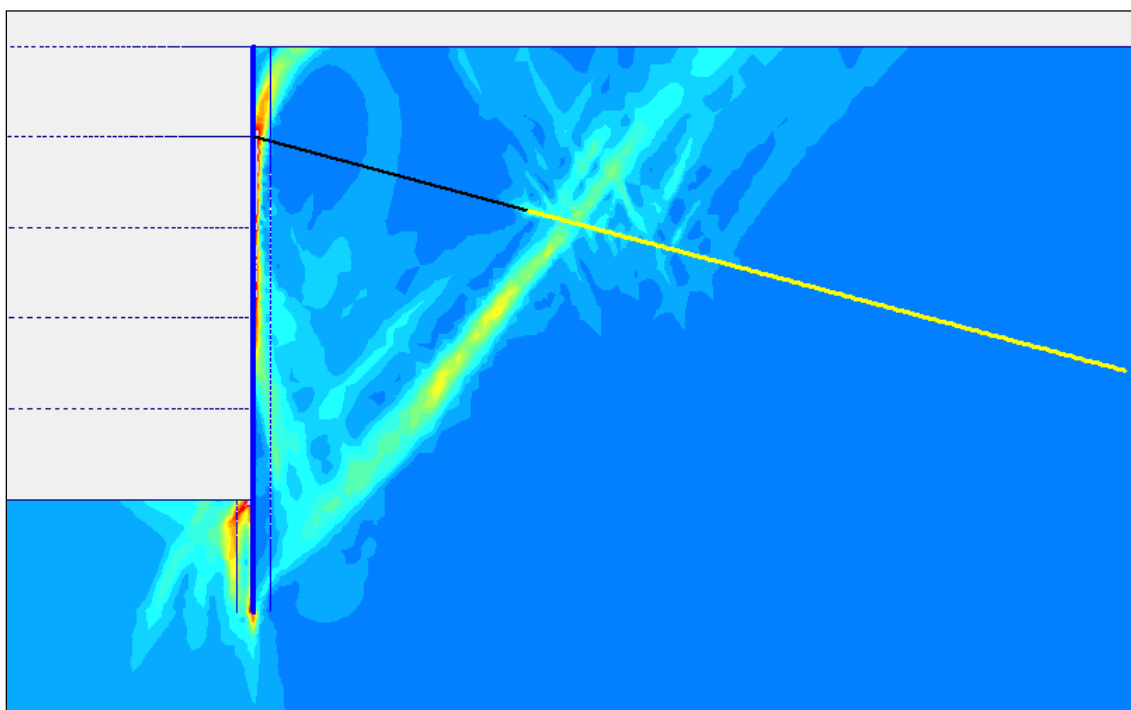


Figura 5.2 Deformaciones de corte en pantalla anclada al 100% de la fuerza de anclaje con ángulo de rozamiento de 37°. Los colores azulados indican valores pequeños de deformación. El color rojo y amarillo representa valores altos de deformación.

Por otra parte, el estado tensional correspondiente a las tensiones principales tampoco corresponde exactamente al teórico. Estas cuestiones y otras se comentan en los siguientes apartados.

5.6.2 Pantalla anclada al 100% del método clásico

En el desarrollo de este apartado se utiliza como ejemplo uno de los dos casos analizados para la obtención del ángulo de rotura: pantalla anclada al 100% del método clásico. Los resultados adicionales obtenidos para el caso de pantalla con una fuerza de anclaje del 200% pueden verse en el anejo II.

Análisis por ángulos y desplazamientos

Las figuras 5.3.a y 5.3.b muestran la evolución del desplazamiento de diferentes puntos representativos de la pantalla a medida que avanza la excavación. La pantalla en este caso tiene 10 m de alzado y 2,5 m de clava inicial.

La figura 5.3.a representa el comportamiento de la pantalla con un ángulo de rozamiento del terreno de 40° con aplicación de la fuerza de anclaje después de la primera etapa de excavación de 2 m y el conjunto pantalla-terreno es estable.

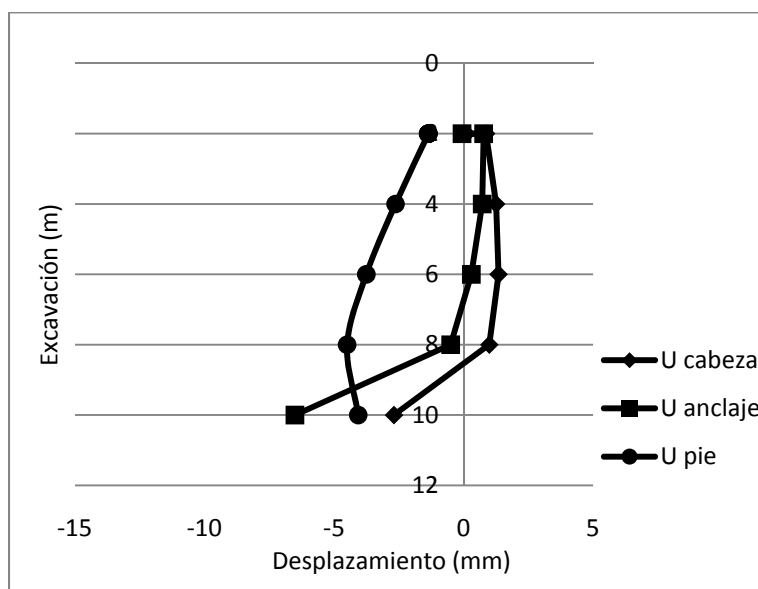


Figura 5.3.a Desplazamientos para clava de 2,5 m y ángulo de 40° . Valores negativos de desplazamiento indican sentido hacia el intradós

En la figura anterior, la aplicación del anclaje genera un desplazamiento contra el terreno del punto de aplicación del anclaje y la cabeza de pantalla, mientras que a medida que avanza la excavación, el desplazamiento de estos puntos aumenta hacia el intradós debido al empuje del terreno. El pie de pantalla se desplaza hacia el intradós con el aumento de la profundidad de excavación excepto en la última fase (entre 8 m y 10 m) donde permanece prácticamente estable, coincidiendo con el máximo desplazamiento del anclaje y de la cabeza de pantalla. En esta evolución de los movimientos con la excavación, el punto de anclaje actúa como punto giro de la pantalla cuando los empujes todavía son pequeños, mientras que al alcanzar profundidades mayores, el empuje pasivo del terreno limita el desplazamiento del pie de pantalla y los movimientos se concentran en la zona superior de la pantalla.

La figura 5.3.b representa los movimientos de la cabeza de pantalla, punto de anclaje y pie de pantalla con un ángulo de rozamiento de 37° y clava de 2,5 m. El conjunto se vuelve inestable, no se alcanza convergencia con ángulos menores y los desplazamientos en la zona superior (cabeza y anclaje) se duplican respecto a los de la figura 5.3.a. No obstante, el pie de pantalla no se mueve en la misma proporción y prácticamente se mantiene el valor de desplazamiento que en el caso anterior con un ángulo de 40° . De estas figuras se deduce que el empuje pasivo se ha movilizado en el intradós y son necesarios empujes mayores para generar desplazamientos significativos, por lo que la zona más susceptible de movimientos se traslada a la zona superior de la pantalla.

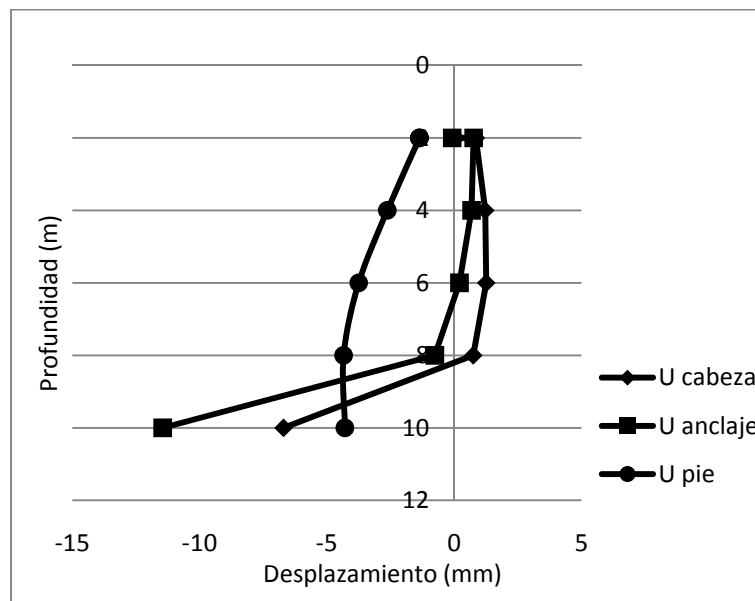


Figura 5.3.b Desplazamientos para clava de 2,5 m y ángulo de 37° (estricto). Valores negativos de desplazamiento indican sentido hacia el intradós

Las figuras 5.4.a a 5.4.d representan el proceso de excavación con la clava aumentada en un 20% (3 m) respecto las figuras anteriores, manteniendo el alzado de 10 m y se muestra la evolución de los movimientos en la cabeza de la pantalla, el punto de anclaje y el pie de pantalla con diferentes ángulos de 40° , 37° , 33° y 30° . En éste último ángulo el conjunto pantalla-terreno es estable y no se alcanza convergencia para ángulos menores. El efecto de los desplazamientos es similar al caso de clava de 2,5 m: los desplazamientos en la zona superior de la pantalla aumentan significativamente con la profundidad de la excavación y la disminución del ángulo de rozamiento mientras que el desplazamiento en el pie de pantalla no varía en la misma proporción.

La figura 5.4.a y 5.4.b representa los movimientos con el mismo ángulo de rozamiento que en la figura 5.3.a y 5.3.b respectivamente, siendo la longitud de clava la única diferencia entre ellas. Si se comparan los movimientos del pie de pantalla en ambos casos, puede verse que el desplazamiento máximo en este punto se mantiene alrededor de 5 mm hacia el intradós, por lo que el aumento de la longitud de clava se traduce en una mayor contribución a la estabilidad debido al empuje pasivo que se moviliza en una porción de terreno mayor, pero sin reducirse el valor del desplazamiento.

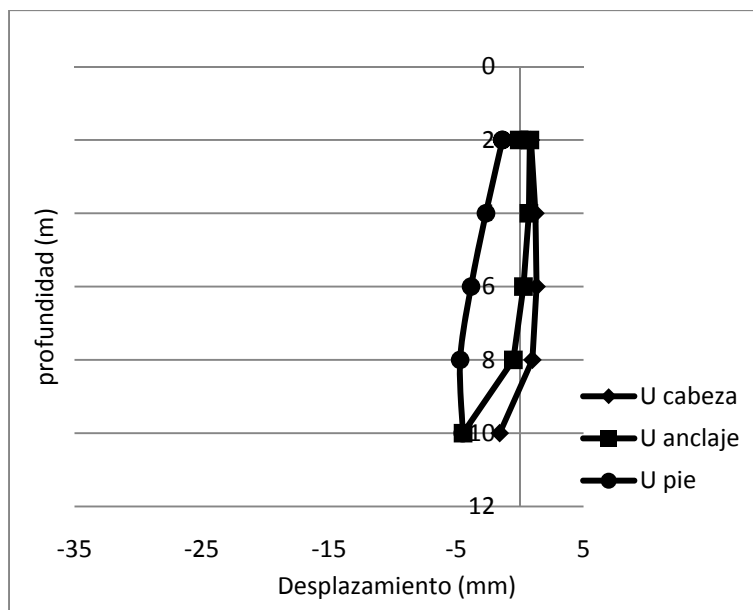


Figura 5.4.a Desplazamientos para clava de 3 m y ángulo de 40°. Valores negativos de desplazamiento indican sentido hacia el intradós

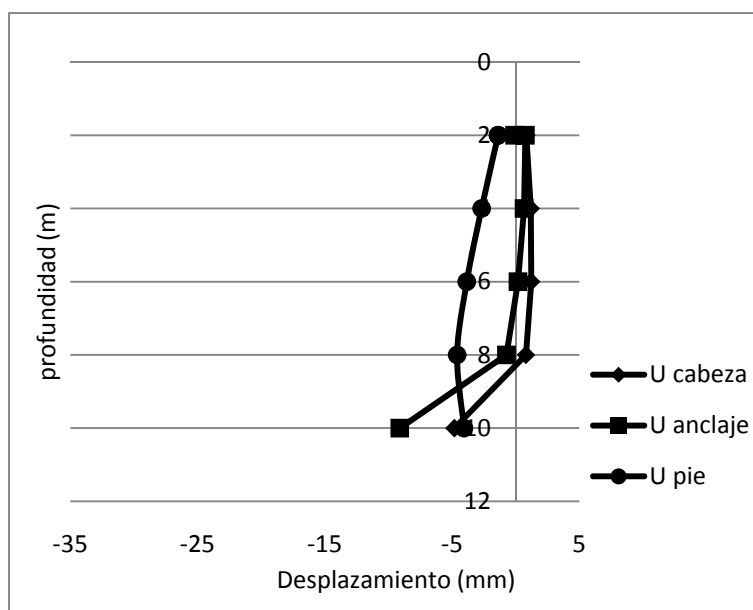


Figura 5.4.b Desplazamientos para clava de 3 m y ángulo de 37°. Valores negativos de desplazamiento indican sentido hacia el intradós

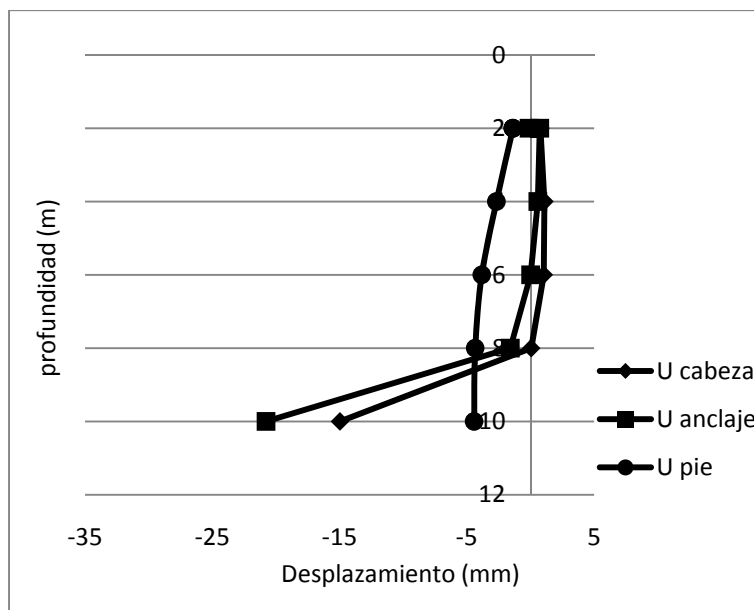


Figura 5.4.c Desplazamientos para clava de 3 m y ángulo de 33°. Valores negativos de desplazamiento indican sentido hacia el intradós

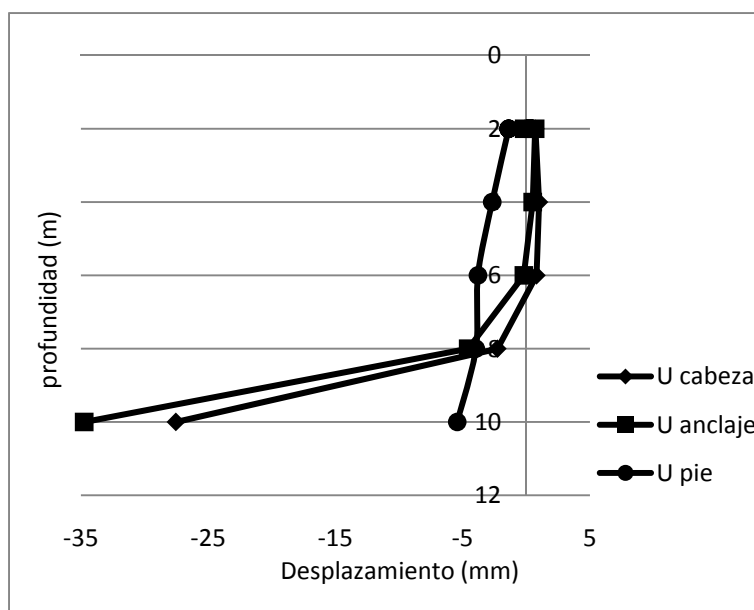


Figura 5.4.d Desplazamientos para clava de 3 m y ángulo de 30° (estricto). Valores negativos de desplazamiento indican sentido hacia el intradós

a) Análisis tensional del pie de pantalla

Para el caso de clava de 2,5 m y ángulo de 40° (figura 5.3.a), el estado tensional alejado de rotura puede verse en la figura 5.5. El conjunto pantalla-terreno ha sufrido un desplazamiento de traslación en el pie de pantalla y se relajan las tensiones en la parte inferior del trasdós, excepto en la parte inferior de la clava, donde existe la tendencia a generar un estado pasivo por el giro de la pantalla no cumpliéndose la

hipótesis de soporte libre, que no contempla el giro de la pantalla en esta zona y por tanto predice que no existe empuje pasivo en el pie de pantalla del trasdós.

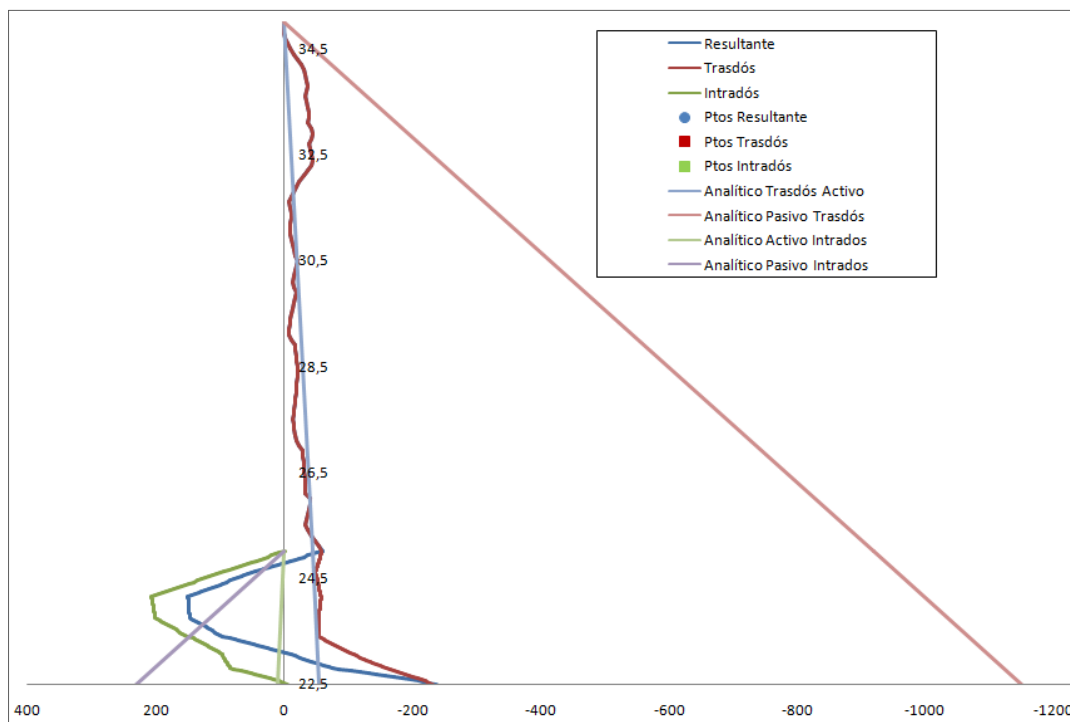


Figura 5.5 Estado tensional. Clava de 2,5m. y ángulo de 40°

Para ángulos inferiores con clava de 2,5 m, el desplazamiento del pie de pantalla en rotura en la última etapa de excavación (figura 5.3.b) es prácticamente el mismo que a 8 m de excavación o que con un ángulo de 40° (figura 5.3.a). En este caso, tal como se muestra en la figura 5.6 correspondiente a 2,5 m de clava y 37°, se ve como en la parte inferior de la clava, la tendencia al pasivo se mantiene en la parte inferior del trasdós pero disminuye su valor ligeramente, la longitud de clava es pequeña y toda ella empuja contra el intradós obligando a aumentar el empuje pasivo sin que se traduzca en un aumento considerable de los desplazamientos. Nuevamente, la predicción de los métodos clásicos para soporte libre no se cumple, por lo que el trasdós en el pie de pantalla contribuye a la estabilidad del conjunto.

Si se analizan las tensiones para el caso en que se incrementa la clava un 20% (3 m) se observa el mismo efecto. En ángulos alejados de rotura de 40°, 37° y 33°, el desplazamiento del pie de pantalla aumenta hasta la penúltima fase de excavación (8 m) y disminuye en la última fase de 2 m (figuras 5.4.a, 5.4.b y 5.4.c). Para el ángulo de 30° cercano a rotura (figura 5.4.d), el desplazamiento en los dos últimos metros de excavación rompe esta tendencia y aumenta ligeramente. Esto se puede contrastar con el estado tensional producido.

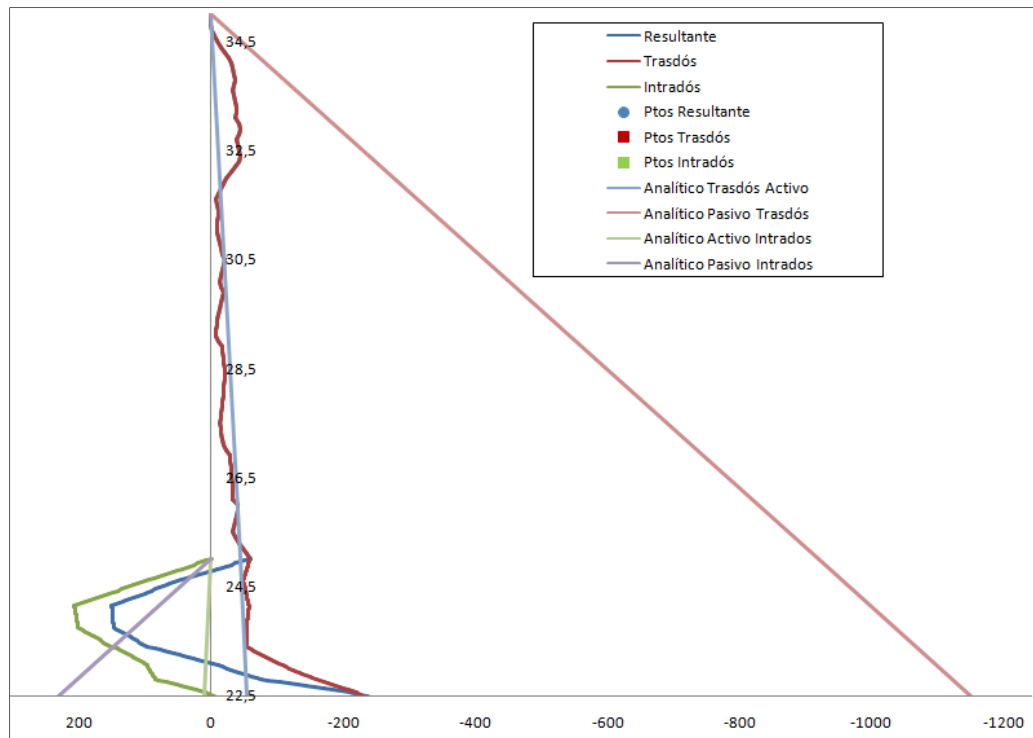


Figura 5.6 Estado tensional. Clava de 2,5m. y ángulo de 37°

En la figura 5.7, clava de 3 m y ángulo de 40°, todavía se tiene un estado tensional lejos de rotura donde la parte inferior de la clava tiende a un estado pasivo, mostrando la resistencia que el terreno moviliza aún con poca longitud de clava.

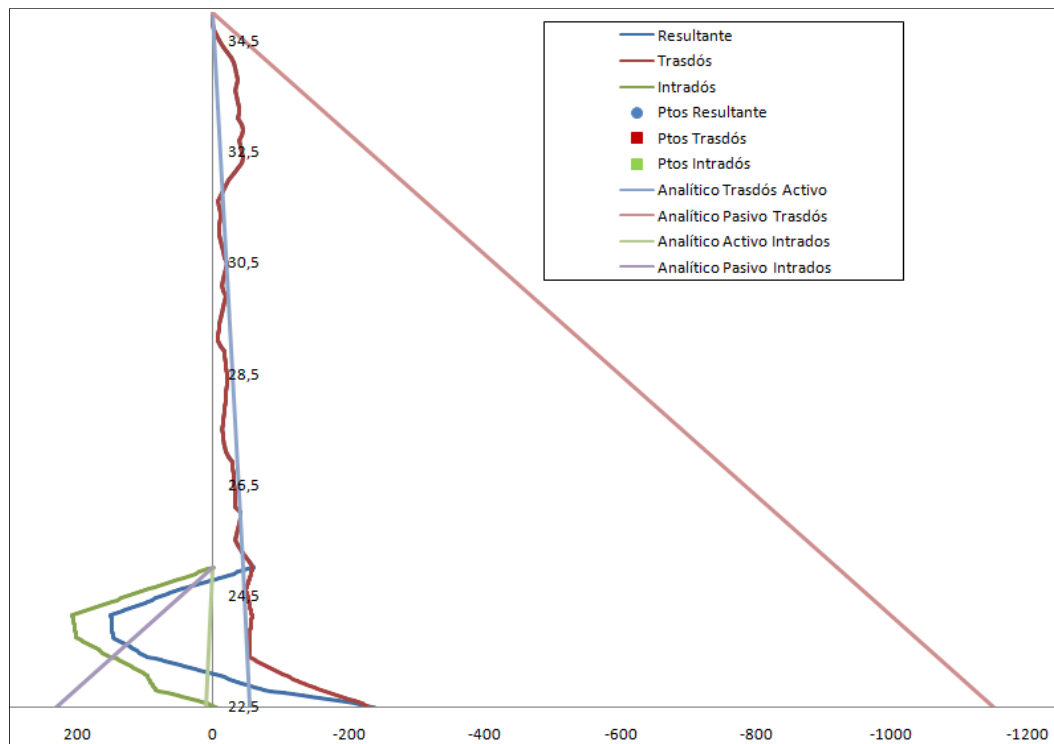


Figura 5.7 Estado tensional. Clava de 3m. y ángulo de 40°

Para estados tensionales cerca de rotura como el de la figura 5.8, ángulo estricto de 30° , la resistencia del conjunto disminuye y el estado tensional se acerca a un estado activo en el trasdós obligando al intradós a movilizar mayor empuje pasivo para mantener el equilibrio. Los desplazamientos han aumentado en la clava y se moviliza más empuje pasivo en el intradós.

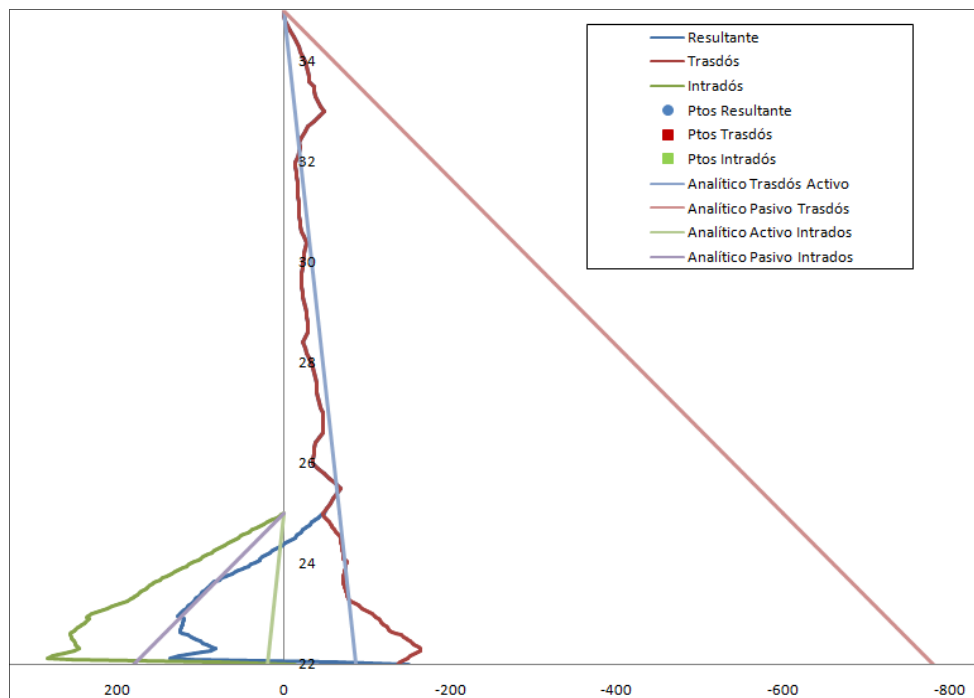


Figura 5.8 Estado tensional. Clava de 3m. y ángulo de 30° (estricto)

En definitiva se deduce que tal y como dicen los métodos clásicos, el punto de giro de la pantalla se encuentra en el punto de aplicación del anclaje pero con la salvedad de que en la zona de clava, el pie de pantalla tiende a generar empuje pasivo en el trasdós. Por lo tanto, a pesar de que la no convergencia numérica no muestre un aumento significativo del desplazamiento del pie de pantalla, la inestabilidad se produce en esta zona aunque con contribución del trasdós a la estabilidad mediante tendencia al empuje pasivo.

b) Análisis tensional de coronación y punto de aplicación del anclaje

La característica más destacada de estos puntos es que el anclaje influye claramente sobre el estado tensional cerca de coronación.

La aplicación de una fuerza de anclaje produce un estado de compresión del terreno en el que, a diferencia de lo que establecen los métodos clásicos donde todo el trasdós se encuentra en estado activo, se produce una tendencia al estado pasivo. En las figuras 5.5 a 5.8 se observa una tendencia al aumento de tensiones alrededor del anclaje (aumento del confinamiento entre la zona activa del anclaje y el paramento de la pantalla) incluso cuando se acerca a rotura.

Las causas que provocan este efecto incluso cerca de la inestabilidad del conjunto seguramente sean debidas a un efecto doble en el que interviene la rigidez del mecanismo pantalla-anclaje y el empuje de tierras que el bulbo ejerce sobre el terreno.

El estado tensional correspondiente a las tensiones principales no corresponde exactamente al teórico. Según la figura 5.9, se puede ver que desde el inicio del bulbo de anclaje hasta la zona de aplicación del anclaje en el paramento de la pantalla, las tensiones sufren un giro hacia un estado pasivo (las cruces pasan de tener el palo vertical mayor en la zona de bulbo a tener el palo horizontal mayor cerca del paramento) a diferencia del estado activo que establecen los métodos clásicos.

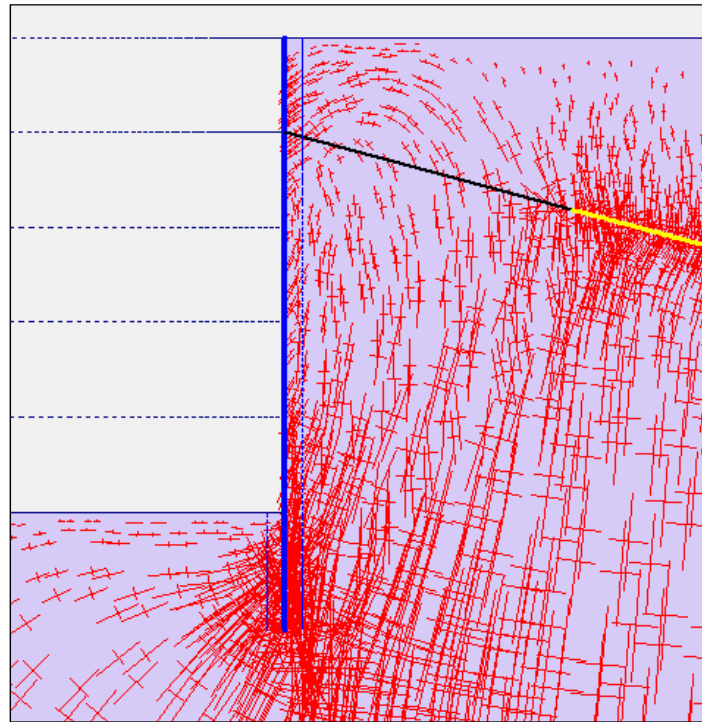


Figura 5.9 Tensiones principales alrededor del anclaje

En la zona situada por encima y por debajo del bulbo (línea amarilla) se puede ver como las tensiones principales, representadas por cruces, corresponden a la tensión vertical y horizontal. Sin embargo, en la zona comprendida entre el bulbo y el punto de anclaje, las tensiones principales sufren un giro que hace que la tensión principal mayor que actúe sobre la pantalla tenga componente horizontal. Este proceso, no considerado en los métodos clásicos, es coherente con el comportamiento del conjunto pantalla-anclaje ya que la zona activa del anclaje tiene que soportar el empuje del terreno sobre la pantalla al mismo tiempo que el terreno alrededor del bulbo empuja contra la pantalla debido a la carga recibida. En consecuencia el confinamiento entre zona activa y paramento aumenta.

A medida que se excava, la pantalla se deforma transmitiendo las tensiones a la zona activa y el aumento del empuje de tierras hace que la pantalla gire alrededor del punto de anclaje. Este efecto junto a la rigidez local de la pantalla alrededor del anclaje provoca que el desplazamiento de la cabeza de pantalla sea inferior a la del punto de anclaje. El punto de anclaje se comporta como una rótula y se produce una contraflecha en la cabeza de pantalla debido al empuje generado por el terreno situado por debajo del punto de anclaje.

En la figura 5.10.a se muestra que en el punto de aplicación del anclaje, cambia el signo del esfuerzo cortante y va disminuyendo hasta que nuevamente cambia de signo debido al empuje del terreno con la profundidad. Al acercarnos al fondo de la clava, el signo de corte nuevamente cambia debido a la presencia del punto de giro a partir del cual el terreno ofrece resistencia por empuje pasivo.

En la figura 5.10.b, el signo del momento por encima del anclaje representa el giro de la pantalla alrededor del anclaje y la compresión de la cabeza de pantalla contra el terreno. El momento en el cuerpo central de la pantalla refleja la deformación debida al empuje de tierras entre el anclaje y la clava, provocando que la pantalla gire cerca del anclaje y el desplazamiento de la cabeza de pantalla sea inferior al del punto de anclaje. En la 5.11.c se puede ver como el desplazamiento en coronación es inferior al del punto de anclaje.

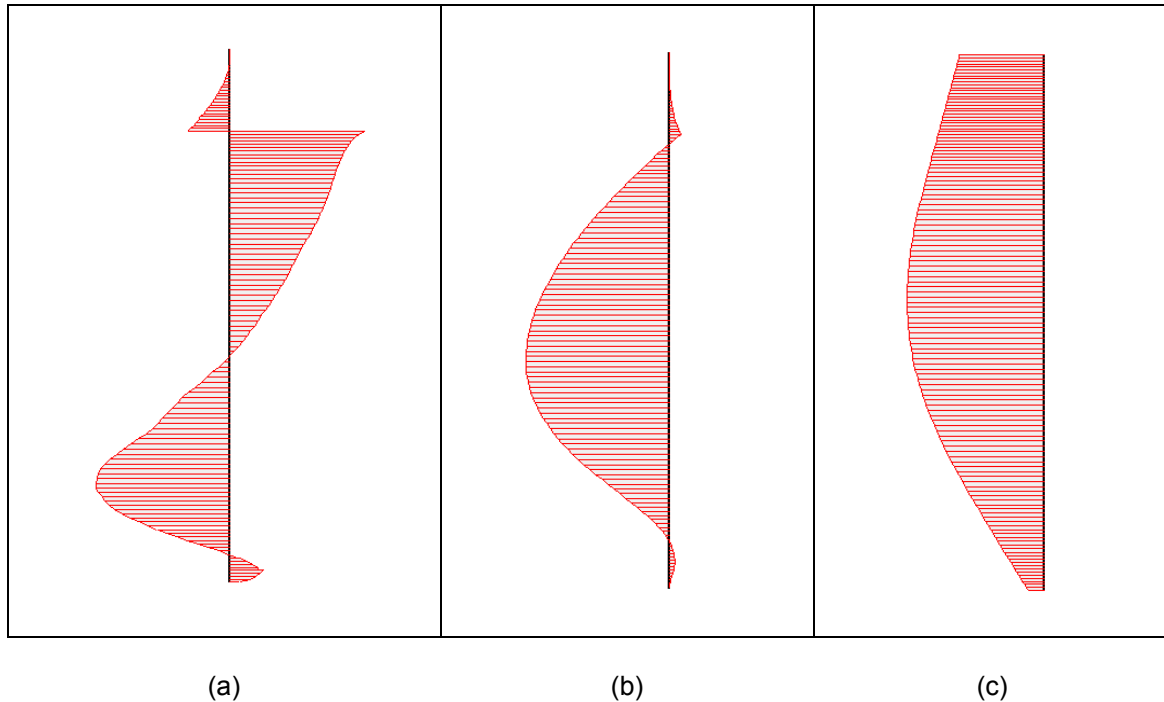


Figura 5.10 Pantalla con clava de 3m. y ángulo estricto de 30°. (a) Diagrama de cortantes. (b) Diagrama de momentos. (c) Desplazamientos horizontales

La zona central de la pantalla, al no tener coaccionado su movimiento y estar alejada del anclaje y de la zona de intradós, tiene permitidas deformaciones mayores pudiendo alcanzar con facilidad el estado activo como se observa en las figuras relacionadas a los estados tensionales.

En el intradós sucede algo similar a pantallas en voladizo. Esta zona, al situarse lejos del anclaje, sólo está influenciada por la poca clava existente que hace que la pantalla, apoyada en el anclaje, empuje contra las tierras en el intradós en una zona más superficial. El estado tensional tiende al pasivo y alcanza más profundidad cuanto más resistencia debe movilizar. Es decir, cerca de la rotura.

Estado tensional por etapas

Al activar el anclaje a una distancia de 2 m de la coronación y hasta ese punto se genera un estado tensional correspondiente a una pantalla en voladizo lejos de rotura. Se alcanza con rapidez un estado pasivo en la superficie del intradós junto con un estado activo en el trasdós hasta la cota de excavación (figura 5.11)

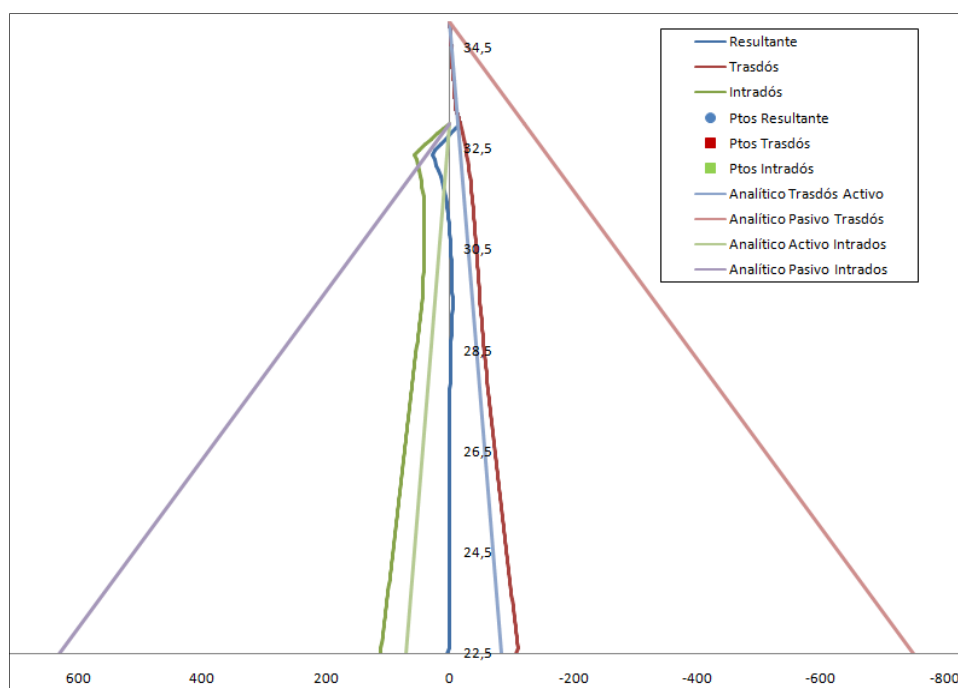


Figura 5.11 Estado tensional a los 2 m de excavación. Clava de 3 m y ángulo de 30° (estricto). El anclaje en este punto todavía no se ha activado

Al aplicar el anclaje (figura 5.12), se contrarrestan los desplazamientos producidos hasta el momento. El estado pasivo en el intradós disminuye al reducirse la presión ejercida por la pantalla y la fuerza del anclaje se concentra alrededor del mismo, aumentando el empuje en sentido contrario al activo y la pantalla se comprime contra el trasdós. En el resto de la pantalla lejos del anclaje las tensiones tienden al reposo.

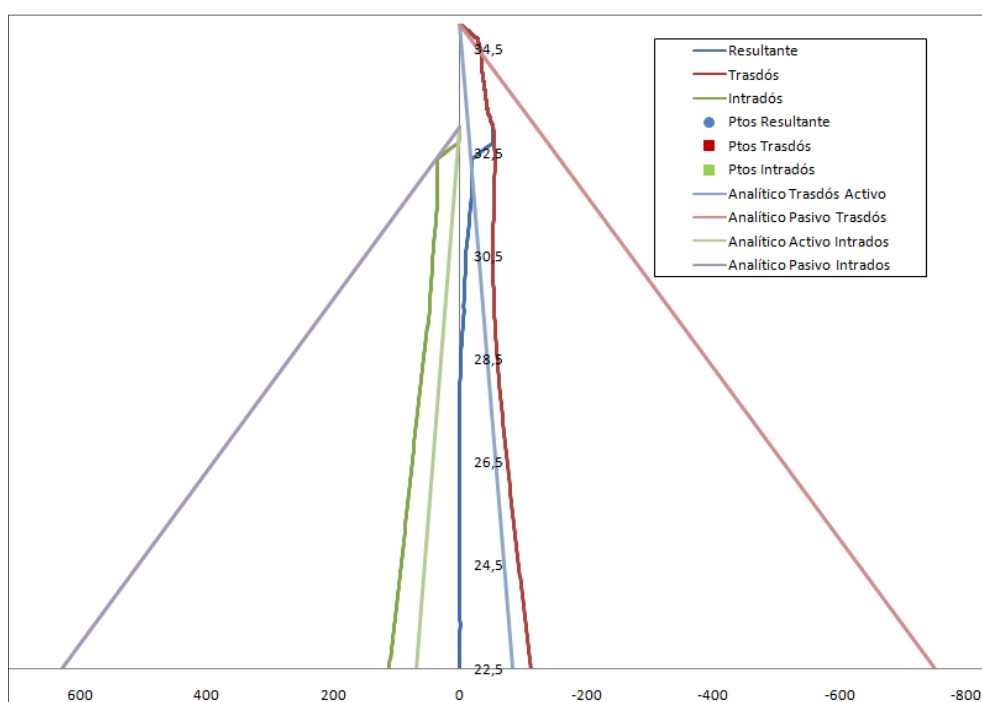


Figura 5.12 Estado tensional al activar el anclaje a los 2 m de excavación. Clava de 3 m y ángulo de 30° (estricto)

A los 4 m de excavación (figura 5.13), sin incrementar la fuerza de anclaje, las tensiones en el trasdós en la zona de anclaje disminuyen. El anclaje entra en carga, el terreno se desplaza y el empuje se relaja. La superficie del intradós vuelve a comprimirse por acción de la pantalla y las tensiones aumentan hacia el estado pasivo. Lejos de la excavación el terreno continúa sin verse afectado y la ley neta indica que no se aleja del reposo.

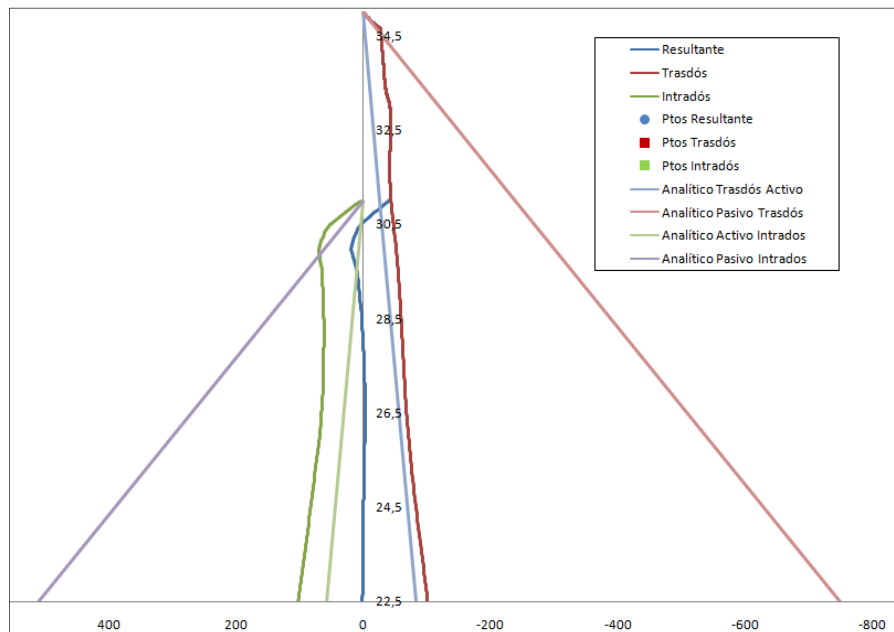


Figura 5.13 Estado tensional a los 4 m de excavación. Clava de 3 m y ángulo de 30° (estricto)

A partir de 6 m de excavación (figura 5.14), las tensiones en la zona de anclaje disminuyen ligeramente, ya que el confinamiento del terreno generado entre el punto de anclaje y el bulbo, junto a la rigidez de la pantalla, disminuye los movimientos en dicha zona manteniendo el estado tensional prácticamente intacto.

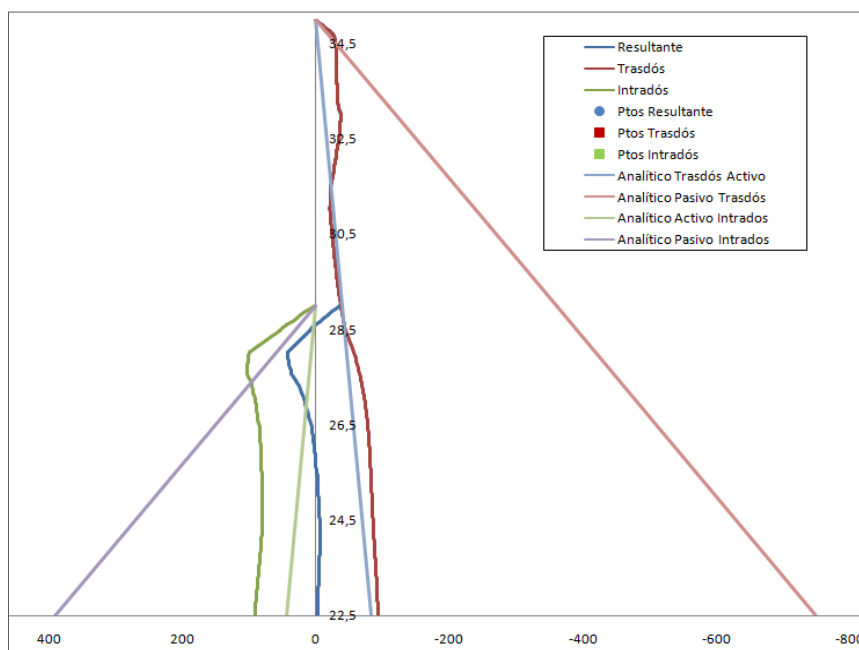


Figura 5.14 Estado tensional a los 6 m de excavación. Clava de 3 m y ángulo de 30°

En la figura anterior, la zona del trasdós comprendida entre el anclaje y la cota de excavación, el desplazamiento aumenta y las tensiones en el trasdós se relajan hacia el activo analítico, por lo que las tensiones en la superficie del intradós aumentan.

A los 8 m de excavación (figura 5.15), la zona comprendida entre anclaje y excavación continúa con la misma tendencia de relajación de tensiones debido a la deformación. Aumenta el empuje pasivo en el intradós y en la zona profunda de la clava se comienza a movilizar empuje para mantener la estabilidad.

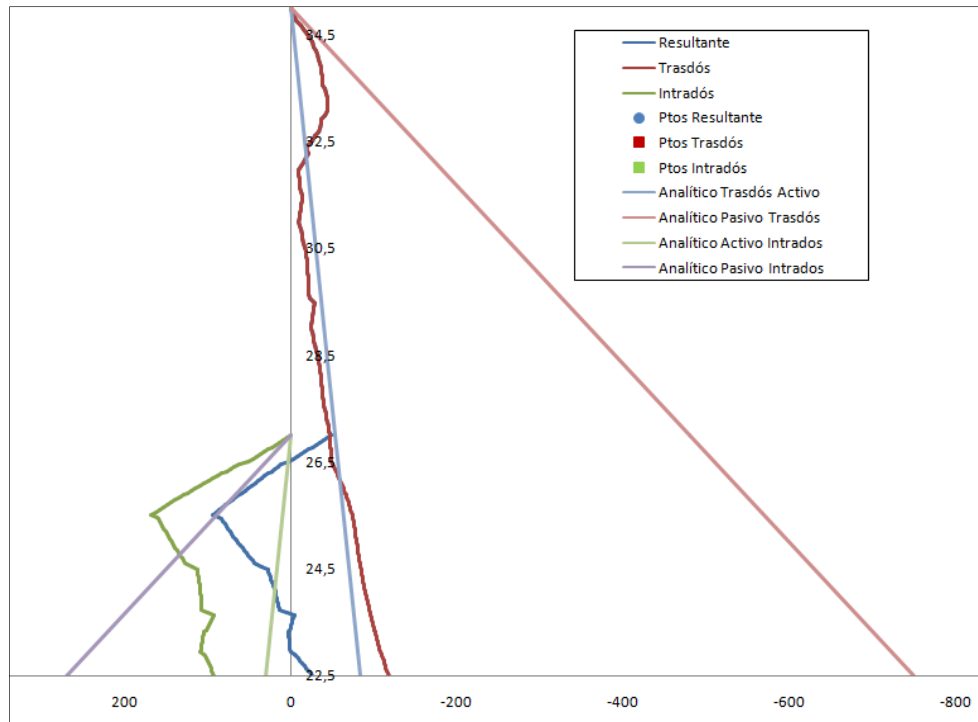


Figura 5.15 Estado tensional a los 8 m de excavación. Clava de 3 m y ángulo de 30°

En la última fase de excavación (figura 5.16), disminuyen los empujes en la zona de anclaje debido a su propia deformación. En el cuerpo central de la pantalla, donde más se deforma, las tensiones del intradós se relajan al tiempo que aumentan las del trasdós bajo la excavación. Existe cierta incertidumbre en el estado tensional que Plaxis proporciona en el extremo de la clava, pero se intuye que el movimiento de traslación en esta zona provoca un aumento de las tensiones contra el intradós superior mientras que el giro hace incrementar las tensiones sobre el trasdós inferior.

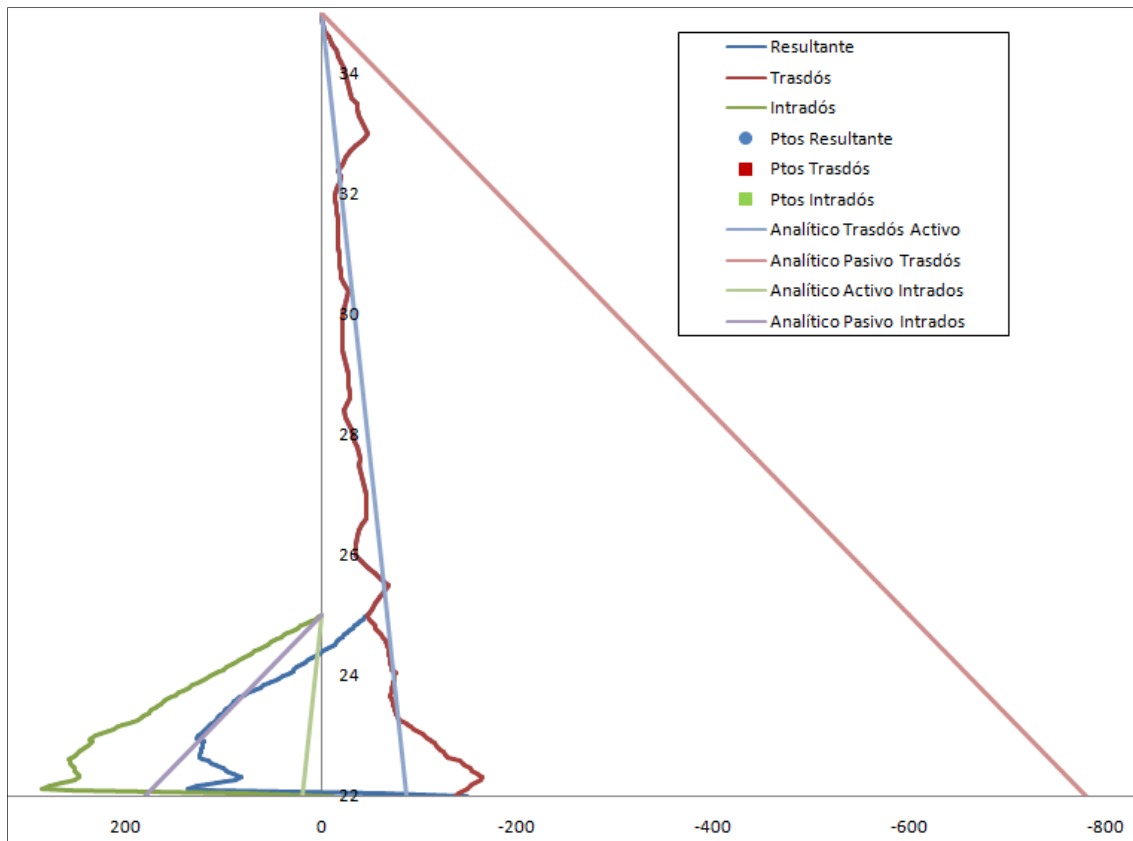


Figura 5.16 Estado tensional a los 10 m de excavación. Clava de 3m y ángulo de 30°

5.6.3 Análisis de la fuerza de anclaje

Los métodos clásicos proporcionan una fuerza de anclaje pero no resuelven la interacción con el terreno ni su evolución en servicio ya que únicamente proporcionan una fuerza de equilibrio en rotura. Sin embargo esta carga será distinta en servicio y dependerá de la historia seguida.

Se ha llevado a cabo el estudio de la fuerza de anclaje para la pantalla de 10 m de alzado y 2,5 m de clava con un ángulo de 37°, por debajo del cual Plaxis no logra convergencia, y se han aplicado diferentes fuerzas de anclaje activadas en distintas etapas de excavación. Por consiguiente, la incógnitas que se plantean son: cómo y cuánto aumenta la fuerza de carga y hasta dónde llega su valor final. El siguiente paso ha consistido en analizar la influencia de las diferentes fuerzas de anclaje sobre el estado tensional final.

En la tabla 5.3 se presentan los resultados obtenidos para una fuerza de 0, 50, 100, 200 y 300 % con el anclaje situado a 2 m de profundidad, aunque para cada fuerza, la activación del anclaje se ha realizado según diferentes profundidades de excavación de 2, 4 y 5 m de profundidad, excepto la de 300% que sólo se ha aplicado a los 2 m de excavación por problemas de convergencia. Todos los resultados numéricos pueden verse en la tabla 5.3 y el anejo II de pantallas ancladas a un nivel donde también se muestran otras fuerzas iniciales de tesado.

Tabla 5.3 Fuerzas de anclaje al inicio y final de la excavación según profundidad de excavación en la que se activa el anclaje. (*) No se logra convergencia al final de la excavación. (-) No simulado.

% inicial	F_{inicial}	Fuerza final según excavación de activación		
		F_{2m}	F_{4m}	F_{5m}
0%	0	27,7*	58,89*	54,94*
50%	69	127,6	128,9	81,81*
100%	138	150,5	150	150,5
200%	276	277,7*	263	276*
300%	414	396,7	-	-

La figura 5.17 representa la evolución de la fuerza de anclaje con un tesado inicial del 0%, indica que a pesar de que no se ha obtenido convergencia para el total de la excavación, la fuerza de anclaje final tiende a un mismo valor final. Este comportamiento se repite en el resto de fuerzas aplicadas (figuras 5.18 a 5.21).

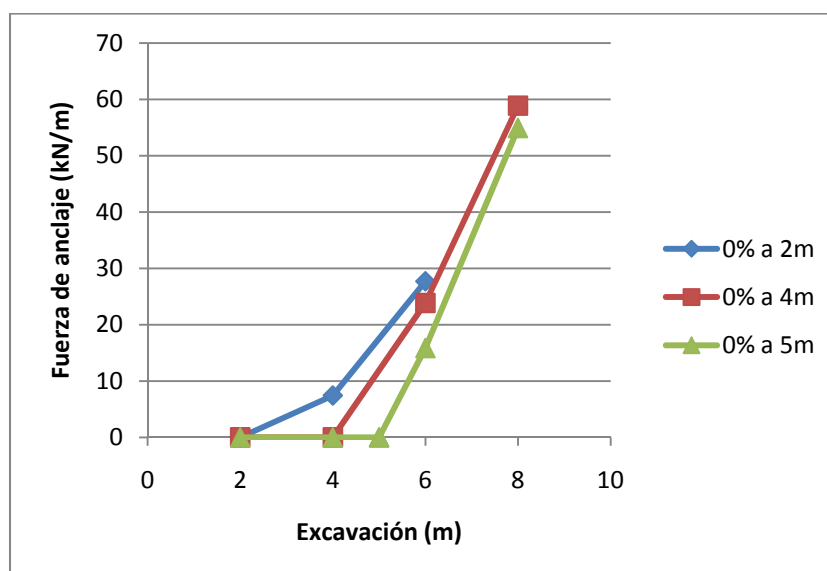


Figura 5.17 Evolución de la fuerza de anclaje para 0% de tesado inicial

En las figuras 5.18 y 5.19 el comportamiento es similar. Cabe destacar la presencia de un rango de excavación en el que la fuerza a la que está sometida el anclaje se mantiene más o menos constante hasta los 8 m de excavación. Obsérvese que el incremento en la última etapa de excavación, de 8 m a 10 m, es menor cuanto más aumenta la fuerza inicial de tesado ejercida. De este modo, para el 50% (figura 5.18) el salto final es de unos 60 kN en contraposición al 100% (figura 5.19) donde el salto final

es de 10 kN aproximadamente. Por lo tanto, a mayor pretensado disminuye la carga final del anclaje.

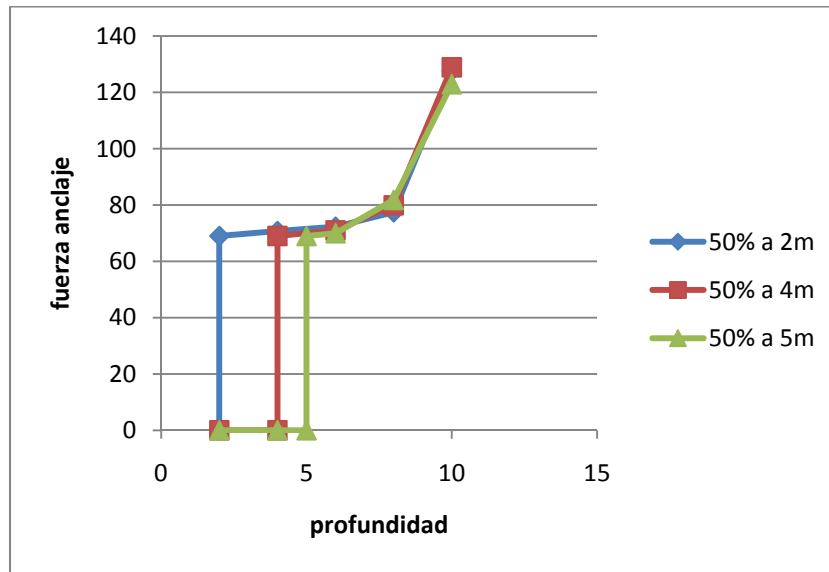


Figura 5.18 Evolución de la fuerza de anclaje para 50% de tesado inicial

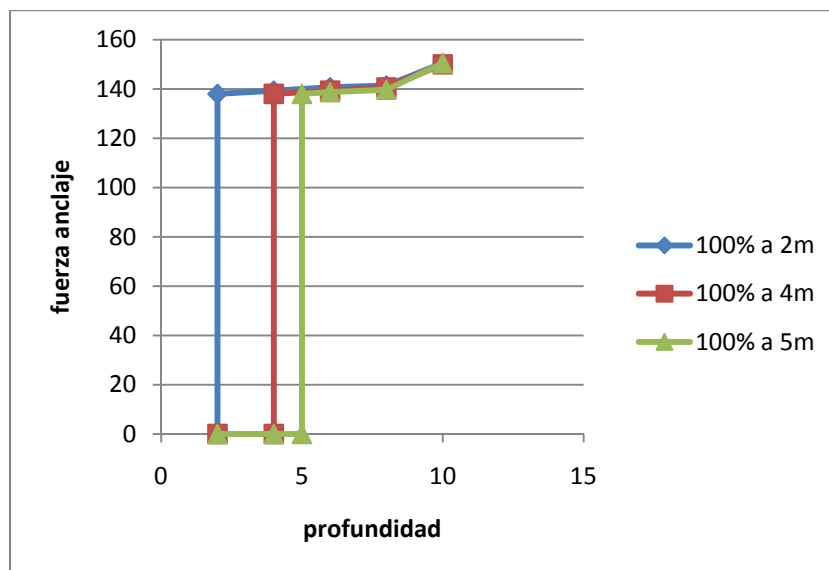


Figura 5.19 Evolución de la fuerza de anclaje para 100% de tesado inicial

Para los casos en que la fuerza de anclaje aumenta considerablemente (figuras 5.20 y 5.21) el efecto es contrario. La fuerza de anclaje se mantiene constante al valor de tesado inicial hasta la última etapa de excavación en que disminuye. No obstante es fácil detectar que la reducción de la fuerza en la última etapa no difiere en magnitud ya que para ambos casos el descenso del valor es de 15 kN aproximadamente. Este hecho contrasta con el salto producido en los casos de 50% y 100% de tesado inicial donde sí que existe variación significativa del aumento de carga en el anclaje para la última fase.

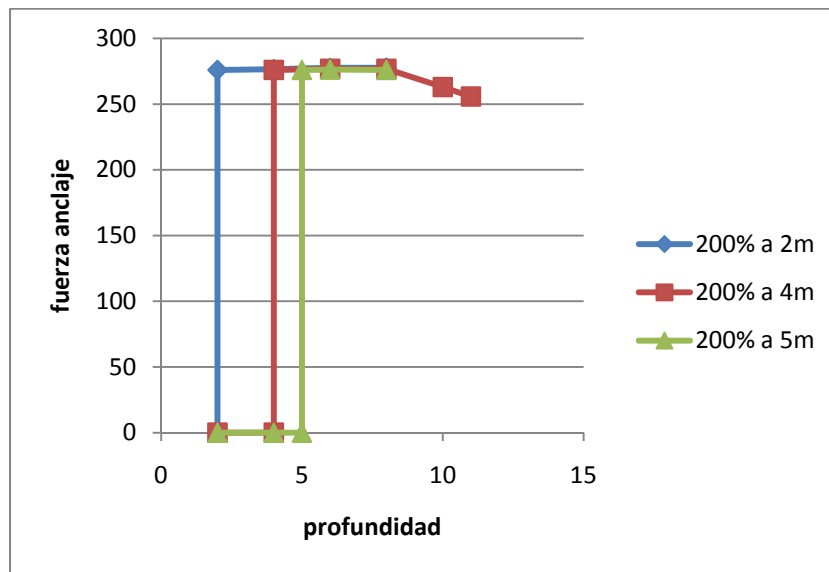


Figura 5.20 Evolución de la fuerza de anclaje para 200% de tesado inicial

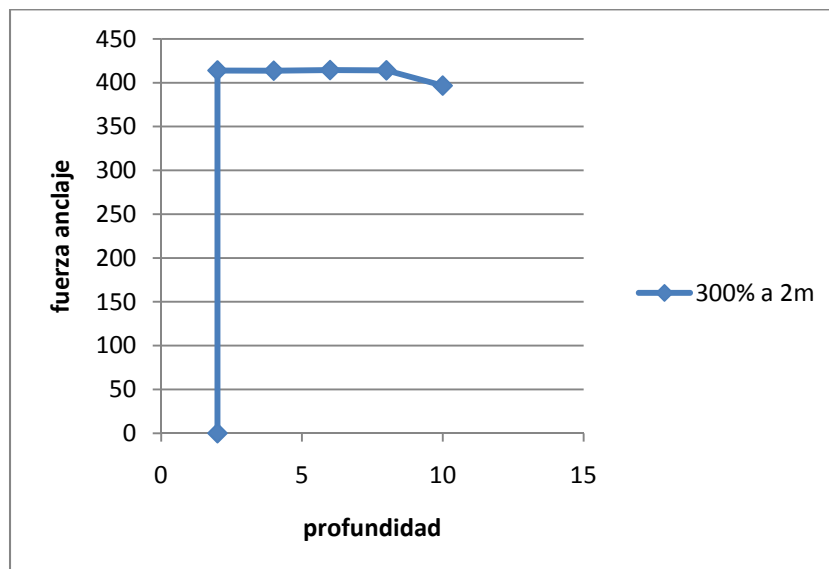


Figura 5.21 Evolución de la fuerza de anclaje para 300% de tesado inicial

Ya se ha visto como se comporta el anclaje para un mismo tesado inicial según el momento de la excavación en que se aplica. Si se presta atención a los valores alcanzados, la fuerza final es diferente para cada tesado inicial aunque para una misma fuerza de anclaje inicial, el valor final no depende de la etapa de excavación en que se activa.

Si se superponen estos valores como se muestra en la 5.22, destaca la tendencia de que todas las fuerzas finales se dirigen al encuentro de un rango común de valores de tesado de anclaje, situado a la derecha de la gráfica. Este comportamiento es más fácil de intuir para valores bajos del pretensado en los que claramente la fuerza final

converge a un punto en común. Para valores superiores de pretensado la tendencia se mantiene pero no con tanta claridad.

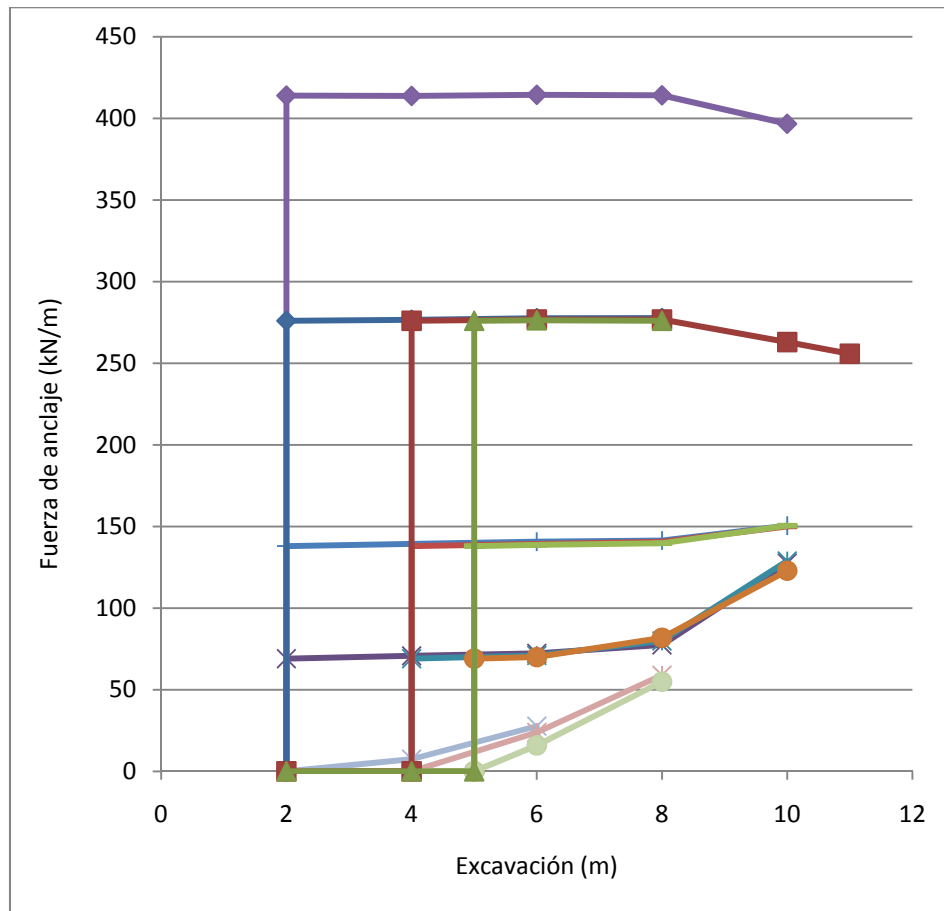


Figura 5.22 Superposición de la evolución de la fuerza de anclaje para los casos anteriores. En orden descendente se tiene 300%, 200%, 100%, 50% y 0%

Trayectoria de tensiones

Después de estudiar la fuerza de anclaje es necesario ver cómo se traduce su efecto en el estado tensional del terreno. Se han analizado las trayectorias de tensiones de un punto situado a medio metro por encima del punto de anclaje y cercano a la pantalla.

Para una fuerza de tesado de 50, 100, 150, 200 y 300 % se ha representado la trayectoria en componentes del plano de Lambe (p-q) correspondientes a la tensión media normal y de corte. Al mismo tiempo se ha representado las rectas analíticas de rotura en el plano citado correspondientes a un criterio de rotura por compresión y a un criterio de rotura por extensión. De este modo el estado tensional teórico de rotura debe situarse en el rango de tensiones comprendido entre las dos rectas dadas por las ecuaciones 5.8 y 5.9:

$$q = p' \frac{6\sin(\phi)}{3 + \sin(\phi)} + c' \frac{6\cos(\phi)}{3 + \cos(\phi)} \quad (\text{ec.5.8})$$

$$q = p' \frac{6\sin(\phi)}{3 - \sin(\phi)} + c' \frac{6\cos(\phi)}{3 + \sin(\phi)} \quad (\text{ec. 5.9})$$

En la figura 5.23 se muestra un ejemplo de la trayectoria de tensiones de un punto situado a 0,5 m por encima del anclaje, para la pantalla con 10 m de alzado, 2,5 m de clava y una fuerza de anclaje del 200% respecto a la proporcionada por métodos clásicos.

El punto 1 representa el estado tensional después de excavar 2 m, y es en esta profundidad que, al activar el anclaje, las tensión media y de corte aumentan hasta el punto 2. A partir de aquí, la presión de confinamiento “p” disminuye debido a la continuación de la excavación ya que el punto 3 representa la excavación de 4 m, el punto 4 la excavación de 6 m y 8 m, el punto 5 la excavación de 10 m y el punto 6 la excavación adicional de un metro en la que se ha conseguido convergencia, por lo que la profundidad total de la excavación es de 11 m en este caso.

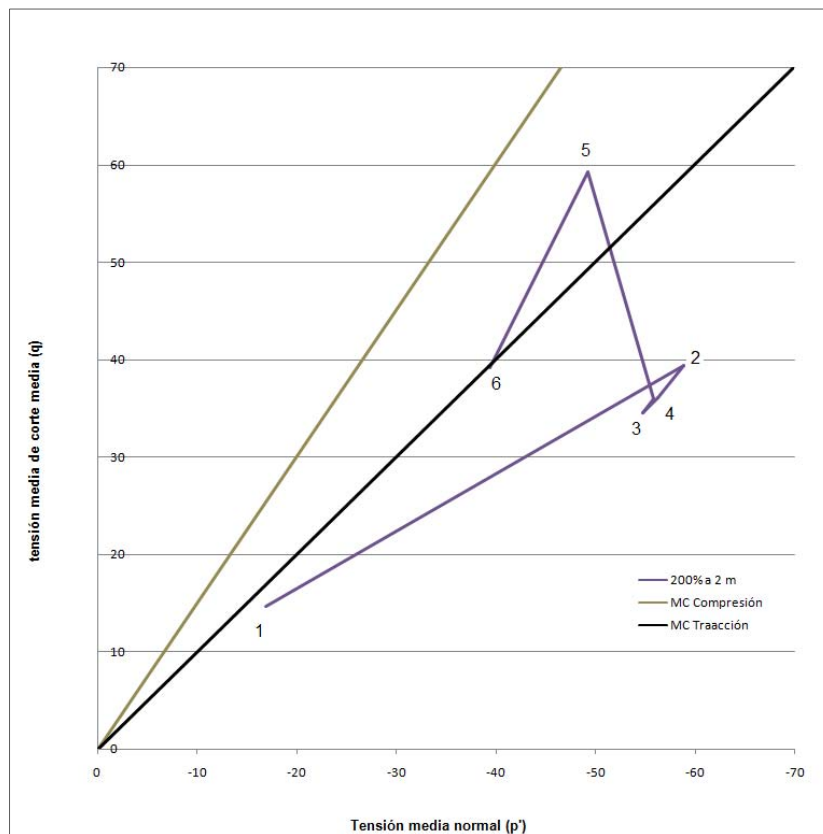


Figura 5.23 Trayectoria de tensiones de un punto situado 0,5 m por encima del anclaje con una fuerza aplicada en el mismo del 200% del teórico.

Para poder explicar cada una de las trayectorias de la figura 5.23, en la tabla 5.4 se muestra el valor de la tensión vertical y horizontal en cada fase de excavación para el punto analizado a 0,5 m por encima del anclaje.

Tabla 5.4 Valores de la tensión vertical y horizontal para diferentes profundidades de excavación según los puntos indicados en la figura 5.23

Punto	Excavación (m)	Tensión Vertical (kN/m ²)	Tensión Horizontal (kN/m ²)
1	2	26	12
2	2	55	81
3	4	52	78
4	6	51	76
4	8	50	79
5	10	37	81
6	11	36	59

Según la tabla 5.4 los valores de tensión son los esperados para los dos primeros metros de excavación (punto 1). La tensión vertical es superior a la horizontal y el anclaje todavía no ha sido activado.

En el punto 2 se ha activado el anclaje y la tensión horizontal supera en módulo a la tensión vertical. El efecto de que la tensión vertical aumente junto con la tensión horizontal sin que se haya modificado el peso de terreno situado por encima, se debe al rozamiento entre la pantalla y el terreno al activar el anclaje: la pantalla se comprime contra el terreno y empuja con ella a la parte de terreno cercana al paramento, por lo que la tensión vertical aumenta. De este modo se tiene que entre los puntos 1 y 2 tanto el confinamiento “p” como la tensión de corte “q” aumentan y la trayectoria es ascendente.

Cuando la excavación aumenta hasta el punto 3 (4 m), la pantalla se desplaza por empuje del terreno y el anclaje se deforma elásticamente, por lo que la tensión vertical inicia la tendencia a disminuir mientras que la tensión horizontal, aunque en este punto también disminuye, permanece constante si se contrasta con los valores posteriores. Este proceso se repite en el punto 4 donde la excavación alcanza los 8 m de profundidad. La trayectoria de 2 a 4 indica que el confinamiento y la tensión media de corte disminuyen debido a un ligero descenso en el valor de la tensión vertical y horizontal.

El punto 5 muestra un aumento de la tensión media de corte al mismo tiempo que el confinamiento disminuye. En este punto la tensión horizontal se sitúa en su valor máximo debido al empuje del terreno contra la pantalla pero la tensión vertical disminuye debido al desplazamiento y a la disipación del efecto local de rozamiento pantalla-terreno. En el punto 6, cercano a no convergencia, la tensión vertical es cercana a la tensión teórica vertical debida al peso del terreno y la deformación del anclaje, junto con la concentración del desplazamiento en la zona de pantalla comprendida entre el anclaje y la superficie del intradós, provoca una disminución notable de la tensión horizontal.

La figura 5.24 representa la trayectoria de tensiones de diferentes fuerzas de anclaje aplicadas sobre la pantalla. El recorrido de todas ellas es similar al analizado en la figura 5.23: al aplicar el anclaje el confinamiento y la tensión de corte aumenta; entre los 2 y 8 m de excavación, lejos de rotura, el estado tensional se mantiene estable y en la última fase de excavación, cerca del equilibrio límite, la tensión media de corte aumenta hasta su valor máximo. A diferencia del caso desarrollado en la figura 5.23,

en el resto de casos mostrados en la figura 5.24, no se ha logrado convergencia al intentar simular un metro de excavación adicional hasta los 11 m.

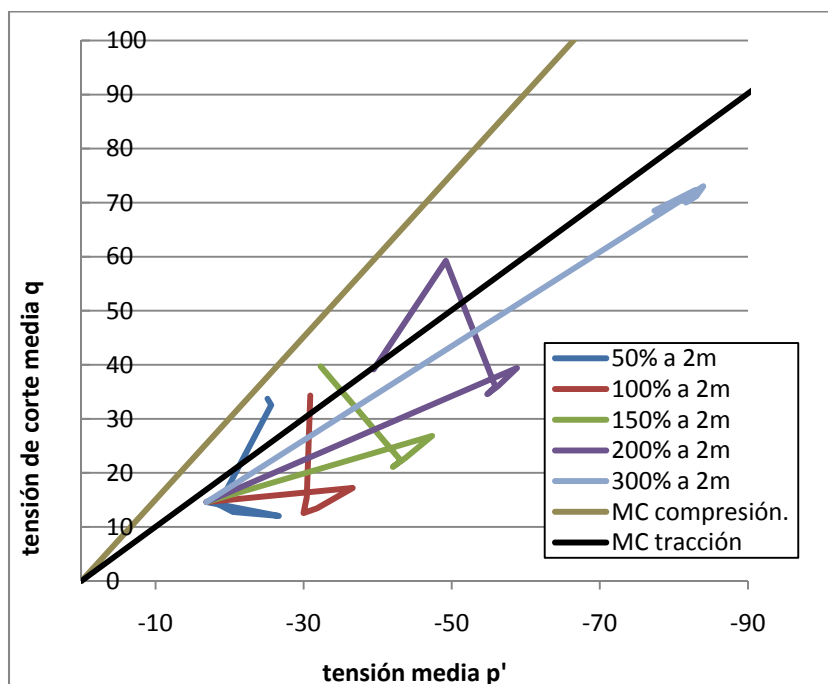


Figura 5.24 Trayectoria de tensiones de un punto situado por encima del anclaje según diferentes fuerzas de tesado inicial. La recta de rotura por extensión es la inferior.

En la figura 5.24 se puede ver que cuando los valores de la fuerza de anclaje son cercanos a la teórica según el método clásico (50,100,150 %), la pantalla se desplaza por deformación del anclaje y el estado tensional final tiende a un punto común debido a la descompresión del terreno. Para los casos de 200 y 300 % de la fuerza de anclaje, el estado tensional final se aleja de los obtenidos por el resto de fuerzas. Se deduce que el anclaje ha comprimido la pantalla contra el terreno lo suficiente para alterar el estado tensional y no permitir la deformación esperada del anclaje. En consecuencia se ha simulado el análisis contrario: aumentar la fuerza de anclaje hasta rotura sin modificar la excavación para comprobar si el estado tensional final alcanzado por exceso de fuerza de anclaje se traduce en una tendencia hacia un punto común. La figura 5.25 muestra la trayectoria obtenida en la que el estado tensional en rotura por exceso de fuerza en el anclaje tiende hacia un mismo valor.

En la figura 5.25 se ha aumentado la fuerza de anclaje hasta no convergencia una vez se ha simulado la excavación por completo. En todos los casos la fuerza final de anclaje obtenida se sitúa alrededor de 800 kN y el valor de la tensión vertical y horizontal aumenta conjuntamente debido al efecto local de rozamiento pantalla-terreno, por lo que el valor de la tensión media normal y tensión media de corte siguen una trayectoria ascendente. El valor final del estado tensional parece indicar que, del mismo modo que sucedía por descompresión del terreno debido a la deformación del anclaje, existe una tendencia a alcanzar un mismo estado tensional por exceso de compresión a través de la fuerza de anclaje.

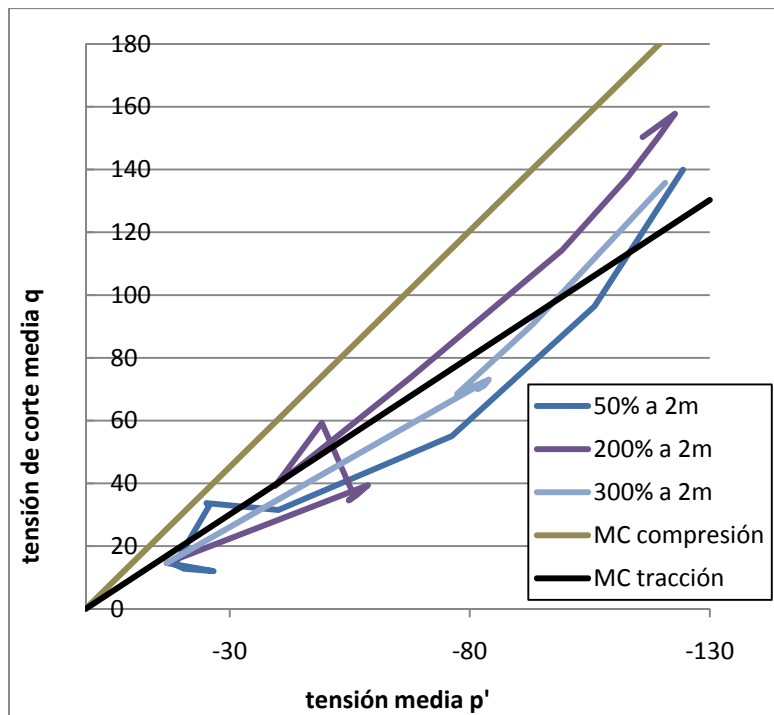


Figura 5.25 Trayectoria de tensiones de un punto situado por encima del anclaje según diferentes fuerzas de tesado inicial, completada la excavación y aumentando la fuerza hasta rotura.

5.6.4 Cohesión

La cohesión es un parámetro resistente que a menudo se desprecia en los cálculos geotécnicos de diseño debido a su variabilidad y a no poder asegurar su existencia a lo largo del tiempo, permitiendo en todo caso una seguridad adicional.

Además del estado tensional y la fuerza de anclaje se ha hecho un análisis de la cohesión partiendo de la experiencia de pantallas en voladizo. La figura 5.26 pone de manifiesto la relación entre la cohesión y el ángulo de rozamiento con la presencia de un anclaje. El estudio se ha llevado a cabo sobre la pantalla con clava inicial de 2,5m. y ángulo estricto de 37° .

Despreciar la cohesión en el diseño de pantallas disminuye la probabilidad de colapso ya que, tal y como se muestra en la figura 5.26, puede llegar a contribuir en gran medida a la estabilidad del conjunto. No obstante, se recuerda que tener en cuenta este parámetro puede ser peligroso debido a los cambios de magnitud que puede sufrir en el tiempo según las condiciones en que se encuentre el terreno.

Hay que tener presente que considerar un solo caso puede no ser del todo representativo de todas las situaciones ni de otros casos. Sin embargo permite observar, sin descartar análisis más profundos sobre el tema, la elevada contribución de la cohesión sobre la estabilidad del conjunto.

Los resultados obtenidos sobre su contribución al factor de seguridad pueden observarse en el apartado 5.7 “Factores de seguridad” donde se detalla la descomposición hecha del factor de seguridad y los valores obtenidos. La relación que mantiene con el ángulo de rozamiento se explica a continuación junto con el procedimiento utilizado.

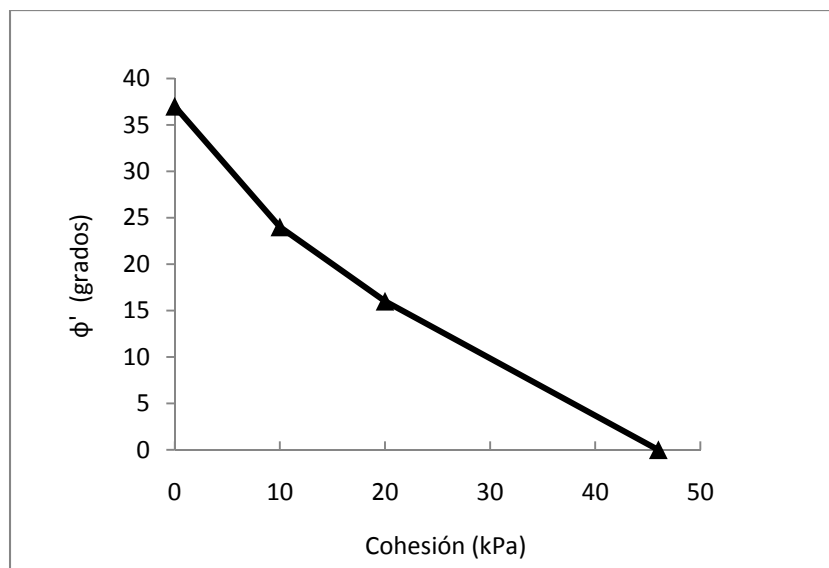


Figura 5.26 Relación ángulo de rozamiento-cohesión

5.7 Factores de seguridad

Siguiendo el esquema de pantallas en voladizo, se han determinado factores de seguridad referido a parámetros por considerarse más realistas.

El presente apartado resume el resultado de los casos llevados a cabo en los que, mediante el factor de seguridad, se refleja las diferencias entre ambos métodos de cálculo: clásicos y numérico.

En primer lugar se describe los diferentes factores de seguridad calculados: criterio adoptado y significado. En el segundo apartado se muestra el valor de cada factor de seguridad descrito.

5.7.1 Descomposición del Factor de Seguridad

Los factores de seguridad se han definido a través de la descomposición del factor de seguridad en sucesivos sub-factores multiplicativos que permiten valorar cada efecto por separado.

Como se muestra en la tabla 5.5, se han determinado 4 ángulos de rotura por cada método analítico para pantallas ancladas a un nivel:

Para el método de soporte libre, cuya hipótesis es que el pie de la pantalla tiene permitido el movimiento, se obtiene:

- ϕ_{sl} y $\phi_{sl_{20\%}}$: para clava inicial de 2,5 m y clava aumentada un 20% de 3 m.
- ϕ_{slr} y $\phi_{slr_{20\%}}$: para clava inicial de 2,5 m y clava aumentada un 20% hasta 3 m. En ambos casos se ha reducido el coeficiente de empuje pasivo a dos tercios de su valor original.

En el caso del método de cálculo con hipótesis de soporte fijo, que supone que la pantalla anclada se encuentra empotrada en el pie y no sufre desplazamiento, se obtiene:

- ϕ_{sf} y $\phi_{sf\ 20\%}$: para clava inicial de 2,5 m y clava aumentada un 20% de 3 m.
- ϕ_{sfr} y $\phi_{sfr\ 20\%}$: para clava inicial de 2,5 m y clava aumentada un 20% hasta 3 m. En ambos casos se ha reducido el coeficiente de empuje pasivo a dos tercios de su valor original.

Por otra parte, mediante Plaxis se obtienen 4 ángulos de adicionales de rotura del terreno debido a que los ángulos de han determinado con dos fuerzas de anclaje distintas:

- $\phi_p^{100\%}$ y $\phi_{p\ 20\%}^{100\%}$: para una fuerza de anclaje del 100% del cálculo analítico con la clava inicial de 2,5 m y con la clava aumentada un 20% hasta 3 m.
- $\phi_p^{200\%}$ y $\phi_{p\ 20\%}^{200\%}$: para una fuerza de anclaje del 200% del cálculo analítico con la clava inicial de 2,5 m y con la clava aumentada un 20% hasta 3 m.

Tabla 5.5 Ángulos de rotura con la pantalla anclada para clava inicial y aumentada 20%. Resultados según métodos clásicos y Plaxis.

Ángulo de rotura (grados)						
Clava	ϕ_{sl}	ϕ_{sf}	ϕ_{slr}	ϕ_{sfr}	$\phi_p^{100\%}$	$\phi_p^{200\%}$
2,5 m	37,14	38,51	41,62	42,91	37	31
3 m	34	37,02	38,68	41,52	30	28

En base a los ángulos de rozamiento obtenidos por cada método de cálculo puede establecerse diferentes factores de seguridad. A continuación se indican los calculados en la tesina:

- FS1 a FS5 (tabla 5.6): es el cociente entre el ángulo de rozamiento, calculado con el mismo método (soporte libre, soporte fijo o Plaxis), que cumple el equilibrio límite con la clava inicial y con un incremento de la clava de un 20%.

$$FS = \frac{\tan \phi_{clava\ inicial}}{\tan \phi_{20\%}}$$

Este factor de seguridad compara los resultados obtenidos mediante el método de dimensionamiento en equilibrio y los resultados obtenidos al aumentar la clava en un 20%. Da una idea de la seguridad que introduce aumentar la clava en un 20%

- FS6 a FS9 (tabla 5.7): indican el factor de seguridad inducido por los métodos clásicos. Se trata del factor de seguridad real acorde con el siguiente procedimiento:

- iii. Para un ángulo real del terreno, se diseña la pantalla con uno de los métodos clásicos.
- iv. Al aumentar la clava un 20%, y tomando los métodos numéricos como el valor más próximo a la realidad, la pantalla se aleja todavía más de la inestabilidad dependiendo de la fuerza de anclaje aplicada. En este caso se muestran los resultados para el 100 y 200% de la fuerza de anclaje de los métodos clásicos.

$$FS = \frac{\tan \phi'_{clava\ inicial}}{\tan \phi'_{plaxis\ clava\ inicial}} \times \frac{\tan \phi_{plaxis\ clava\ inicial}}{\tan \phi_{plaxis\ 20\%}} \times \frac{\tan \phi_{plaxis\ 100\%}}{\tan \phi_{plaxis\ 200\%}}$$

Este factor de seguridad compara los resultados obtenidos mediante el método de dimensionamiento en equilibrio y los resultados numéricos basados en una geometría con la clava aumentada en un 20%, diferente fuerza de anclaje aplicada y terreno con las mismas propiedades. Da una idea de la seguridad que introducen los métodos analíticos de dimensionamiento.

5.7.2 Factores de seguridad obtenidos

La aplicación de los factores de seguridad descritos proporciona, en función de los ángulos obtenidos por cada método de cálculo (tabla 5.5), los resultados mostrados en las tablas 5.6 y 5.7.

La tabla 5.6 muestra los valores del factor de seguridad obtenido a partir de cada método de cálculo (soporte libre, soporte fijo y Plaxis) al aumentar la clava inicial un 20%. Los valores FS1 y FS2 correspondientes a los métodos analíticos (soporte libre y soporte fijo) sin reducción del coeficiente de empuje pasivo, mantienen en todos los casos una relación de 1,12 y 1,06. Para los casos con reducción de empuje pasivo, FS3 y FS4, la relación se mantiene prácticamente igual. Los valores extraídos del análisis con Plaxis presentan mayor variabilidad, que es lógico tratándose de elementos finitos y de formas de rotura diferentes, ya que como se ha visto en el apartado 5.6.3, en función de la fuerza de anclaje aplicada, las tensiones inducidas sobre el terreno así como la deformación del anclaje son distintas, por lo que la rotura se produce por mecanismos distintos.

Los métodos clásicos con reducción del empuje pasivo proporcionan ángulos de rozamiento mayores a los que se obtienen sin reducción de empuje pasivo, pero la diferencia entre el ángulo de rozamiento para la clava inicial y la clava incrementada es aproximadamente igual al caso con reducción de empuje pasivo. Para los factores de seguridad FS1 a FS4 de la tabla 5.5, la diferencia del ángulo de rozamiento entre la clava inicial y la clava incrementada es de aproximadamente 3° para el método de soporte libre y de aproximadamente de 1,5° para el método de soporte fijo.

Tabla 5.6 Factores de seguridad por efecto de aumentar la longitud de clava en un 20%

FS1 $\left(\frac{\tan \phi_{sl}}{\tan \phi_{sl_{20\%}}} \right)$	FS2 $\left(\frac{\tan \phi_{sf}}{\tan \phi_{sf_{20\%}}} \right)$	FS3 $\left(\frac{\tan \phi_{slr}}{\tan \phi_{slr_{20\%}}} \right)$	FS4 $\left(\frac{\tan \phi_{sfr}}{\tan \phi_{sfr_{20\%}}} \right)$	FS5a $\left(\frac{\tan \phi_P}{\tan \phi_{P_{20\%}}^{100\%}} \right)$	FS5b $\left(\frac{\tan \phi_P}{\tan \phi_{P_{20\%}}^{200\%}} \right)$
1,12	1,06	1,11	1,06	1,3	1,13

En la tabla 5.7 se muestran los valores del factor de seguridad obtenido si se compara la tangente del ángulo de rozamiento de la clava inicial calculado con métodos clásicos y el ángulo de rozamiento, considerado más real, obtenido por Plaxis al aumentar la clava un 20% y con distinta fuerza de anclaje aplicada.

Para un mismo ángulo, el método de soporte fijo proporciona mayor clava en comparación al método de soporte libre, ya que considera que el pie de pantalla debe comportarse como un empotramiento. De este modo, para una misma clava, el ángulo de rozamiento proporcionado por el método de soporte libre es menor que el obtenido por el método de soporte fijo. Sucede lo mismo si se tiene en cuenta la reducción del empuje pasivo. Por otra parte, Plaxis no tiene en cuenta las hipótesis conservadoras de los métodos clásicos y por eso el equilibrio límite se alcanza con un ángulo de rozamiento menor al calculado por métodos clásicos. En consecuencia, el factor de seguridad para cada fuerza de anclaje (FSa y FSb) es creciente.

Tabla 5.7 Factores de seguridad del método de dimensionamiento incluyendo aumento de la clava en un 20% una vez determinada por equilibrio

FACTORES DE SEGURIDAD							
FS6a $\left(\frac{\tan \phi_{sl}}{\tan \phi_{P20\%}^{100\%}} \right)$	FS6b $\left(\frac{\tan \phi_{sl}}{\tan \phi_{P20\%}^{200\%}} \right)$	FS7a $\left(\frac{\tan \phi_{sf}}{\tan \phi_{P20\%}^{100\%}} \right)$	FS7b $\left(\frac{\tan \phi_{sf}}{\tan \phi_{P20\%}^{200\%}} \right)$	FS8a $\left(\frac{\tan \phi_{slr}}{\tan \phi_{P20\%}^{100\%}} \right)$	FS8b $\left(\frac{\tan \phi_{slr}}{\tan \phi_{P20\%}^{200\%}} \right)$	FS6a $\left(\frac{\tan \phi_{sfr}}{\tan \phi_{P20\%}^{100\%}} \right)$	FS6a $\left(\frac{\tan \phi_{sfr}}{\tan \phi_{P20\%}^{200\%}} \right)$
1,31	1,42	1,37	1,50	1,54	1,67	1,61	1,74

En el caso de que se tuviese en cuenta el efecto de la cohesión, de igual modo que sucedía en pantallas en voladizo, el factor de seguridad se situaría por encima de los valores mostrados incluso con cohesiones bajas y diferencias de ángulo de rotura similares según el método empleado, ya que para una misma diferencia de ángulos de rotura el cociente entre tangentes aumenta cuanto menor son los valores del ángulo.

6 CONCLUSIONES

A continuación se resumen las conclusiones derivadas del trabajo realizado en la tesina:

Métodos de cálculo

- La simplificación de la realidad que hacen los métodos analíticos de cálculo de pantallas permite comprender de forma general el comportamiento del conjunto pantalla-terreno. Su aplicación es rápida y fiable, ya que su uso requiere el conocimiento de un número reducido de parámetros del terreno y las hipótesis conservadoras en las que se basan lo alejan del mecanismo de rotura. No obstante, su adaptación a condiciones de contorno complejas alejan al cálculo de la realidad y no explican fenómenos locales o puntuales que puedan producirse.
- Los modelos numéricos de elementos finitos como el utilizado para el desarrollo de la tesina mediante el programa Plaxis, requiere conocer un mayor número de parámetros tanto del terreno como de tipo numérico. En consecuencia es necesario conocer la influencia de los parámetros introducidos ya que los resultados varían en función de los mismos. Por otra parte, los métodos numéricos tienen en cuenta todos los elementos que intervienen en el cálculo (geometría, pantalla, terreno, interfase, cargas exteriores, etc.), por lo que su adaptabilidad en la simulación de la realidad lo convierte en una herramienta fiable, que requiere de comprobaciones para validar la bondad de los resultados y cuya interpretación requiere el conocimiento del fenómeno que se estudia.

Pantallas en voladizo

- Debido a la variación del error que se produce cuando se modifican los parámetros de cálculo en Plaxis, es necesario realizar comprobaciones que permitan confiar en la elección del valor de ángulo de rozamiento previo a rotura del conjunto pantalla-terreno.
- La cuña de rotura obtenida por métodos analíticos y elementos finitos no son idénticas pero mantienen una buena similitud. Las principales diferencias se deben a cambios en la distribución tensional debido a efectos locales o fenómenos no considerados en los métodos analíticos.
- El análisis de rotura del conjunto pantalla-terreno mediante la evolución por ángulos muestra claramente una tendencia no lineal del desplazamiento de la pantalla a medida que se acerca al ángulo de rotura.
- El análisis tensional del trasdós muestra que la ley de tensiones debida al empuje activo se cumple a lo largo de todo el alzado de la pantalla, incluso para ángulos alejados de rotura o excavaciones pequeñas, por lo que la pantalla en esta zona entra en carga desde los primeros momentos de la excavación. Sin embargo, en la zona de trasdós por debajo de la cota de excavación, existen diferencias remarcables respecto a las predicciones de los

métodos analíticos. En esta zona, para ángulos alejados de rotura o excavación de poca profundidad, la ley de tensiones se mantiene cerca de la correspondiente al estado de reposo, por lo que un aumento de clava más allá de lo necesario no contribuye a una mejora en las tensiones del terreno. El efecto de la rigidez de la pantalla interviene en la modificación de la ley de tensiones teórica en el trasdós creando una zona elástica de transición entre el empuje activo y el empuje pasivo del trasdós, que eleva la cota del punto de giro de la pantalla y ayuda a la estabilidad del conjunto. El aumento del valor de empuje pasivo en el trasdós del pie de clava indica que la tendencia es alcanzar el valor teórico de dicho empuje.

- En el intradós el valor del empuje activo es muy similar al teórico en el pie de clava, mientras que la principal diferencia se produce en la distribución del empuje pasivo. El análisis tensional muestra que el empuje pasivo se moviliza desde los primeros instantes de excavación o incluso en ángulos lejanos a rotura debido al desplazamiento del alzado contra la zona de trasdós. Sin embargo, su alcance y valor aumenta con la excavación superando el valor teórico por efecto del confinamiento causado por un estado de tensiones tridimensional.
- Debido a un cambio brusco de las condiciones de contorno en el extremo inferior de la clava, se producen picos de tensión difíciles de interpretar incluso por elementos finitos. El estudio de esta zona requiere de análisis más específicos para poder interpretar los resultados
- El análisis del factor de seguridad muestra que un aumento de clava del 20% no se traduce en un mismo aumento del factor de seguridad. No obstante, para cada método de cálculo (simplificado, completo y Plaxis), el aumento de clava del 20% proporciona un FS similar alrededor de 1,15 (tabla 4.5).
- Si se considera el método de cálculo mediante Plaxis como el más cercano a la realidad, el FS aumenta considerablemente en función del método analítico de cálculo empleado. De este modo, el FS real oscila entre 1,3 (para el método simplificado) y 1,8 (para el método completo con reducción del empuje pasivo) según se indica en la tabla 4.6.
- Finalmente el estudio de pantallas en voladizo considerando la cohesión muestra que pequeñas variaciones de este parámetro conduce a un aumento significativo del FS. En consecuencia, no tener en cuenta este parámetro en el cálculo aporta fiabilidad pero considerarlo con un valor erróneo puede tener graves consecuencias.

Pantallas ancladas a un nivel

- Los métodos clásicos establecen dos mecanismos de rotura principales: el de soporte libre, en el que la pantalla sufre un desplazamiento del pie, y un mecanismo de soporte fijo en el que la pantalla permanece perfectamente empotrada. El mecanismo de rotura proporcionado por Plaxis parece indicar un estado de rotura intermedio en el que la pantalla sufre un movimiento de traslación en la zona profunda acompañada de un movimiento de rotación.
- La existencia del anclaje permite reducir la longitud de clava para alcanzar la estabilidad del conjunto. Su introducción introduce un parámetro adicional de estudio que interviene activamente en la distribución de tensiones de la

pantalla y modifica el terreno, por lo que su existencia requiere un análisis más profundo y tiene consecuencias más allá de lo que establecen los métodos analíticos.

- El efecto del anclaje induce cambios significativos en el estado tensional del terreno sobre la pantalla. Su área de influencia se extiende principalmente al punto de aplicación sobre el paramento y a la zona de bulbo, creando una zona de empuje pasivo y aumentando el confinamiento del terreno en la longitud libre del anclaje. Este efecto no es tenido en cuenta en los métodos analíticos por lo que una variación de la fuerza de anclaje requiere de estudios que se alejan de las hipótesis clásicas.
- El estado tensional de pantallas ancladas a un nivel es muy similar al de pantallas en voladizo. Los empujes activos coinciden con los teóricos en el trasdós a excepción de la variación que produce el anclaje en la zona cercana a su punto de aplicación. El empuje pasivo en el intradós aumenta en módulo y profundidad a medida que avanza la excavación y, a diferencia de lo que establece el método de soporte libre, en el pie de clava del intradós se observa una tendencia a generar empuje pasivo para conseguir la estabilidad del conjunto. Por lo tanto, aunque este empuje pasivo no se desarrolle por completo, la pantalla gira alrededor del anclaje y existe otro movimiento de rotación en la parte inferior de la clava.
- El análisis de la fuerza de anclaje muestra que cuando la fuerza aplicada se mantiene en un valor cercano al teórico, la pantalla se comporta tal y como predicen los métodos analíticos: a medida que el anclaje se deforma, se moviliza el empuje pasivo y el valor final de la fuerza de anclaje es similar al proporcionado por métodos analíticos. Sin embargo, valores altos de la fuerza de anclaje lejano al valor de referencia de los métodos clásicos, muestran que se altera el estado tensional del terreno y no se permite el mismo desarrollo del empuje pasivo. Por lo tanto, el mecanismo de rotura difiere de las predicciones de los métodos clásicos y su comportamiento deja de ser comparable.
- El cálculo del FS para cada método muestra nuevamente, como sucedía en pantallas en voladizo, que un aumento del 20% de la clava no se traduce en un mismo aumento del FS, incluso se obtienen valores inferiores a los obtenidos para pantallas en voladizo. De este modo, tal y como se muestra en la tabla 5.6 los valores oscilan entre 1,06 y 1,13 en función del método de cálculo escogido.
- Los factores de seguridad reales mostrados en la tabla 5.7, considerando el cálculo mediante Plaxis como más realista, muestran que los factores de seguridad finales son similares a los obtenidos en pantallas en voladizo. Entre 1,3 y 1,7 dependiendo del método escogido. Se destaca que, a pesar de aumentar la fuerza de tesado en la activación del anclaje, apenas se consigue aumentar la estabilidad del conjunto pantalla-terreno. Los factores de seguridad muestran que un aumento de tesado del 200% no se refleja en un factor de seguridad doble.

El tema de estudio abordado en la tesina hubiese permitido el análisis de otros casos, tales como presencia de agua, comportamiento no drenado, etc. El tiempo y el contenido máximo de la tesina no ha permitido efectuar todos estos casos y dado el interés práctico que suscitan las pantallas, se anima al resto de compañeros a proseguir el trabajo elaborado en esta tesina, revisando su contenido y ampliándolo.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] GONZÁLEZ, M. G (2001). "El Terreno", Edicions UPC. Cap. 4, 6, 11.
- [2] JIMENEZ SALAS, J. A. y DE JUSTO ALPAÑÉS, J. L.(1975) "Geotecnia y cimientos II: mecánica del suelo y de las rocas. Cap. 4,11.
- [3] ROM 0.5-05 (2005) "Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. Ministerio de Obras Públicas Transporte y Medio Ambiente. Puertos del Estado". Cap. 3.7.
- [4] NBE-AE/88 (B.O.E. 17 Nov. 1988) "Acciones en la edificación".
- [5] COULOMB, Ch. A. (1776) " Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèms de statique realtifs à l'architecture, Mem. Div.Sav., Aug. pp.753-755", Rueda, Madrid.
- [6] CALAVERA, J. (2001) "Muros de contención y muros de sótano", Edit. Intemac.
- [7] BLUM, H. (1931) "Einspannungsverhaeltnisse bei bohlwerken, W. Ernst and Sohn, Berlín"
- [8] VV.AA. (2005) "Recomendaciones para el proyecto, construcción y control de anclajes al terreno", ACHE, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- [9] UCAR NAVARRO, R., (2004) "Manual de anclajes en ingeniería civil", E.T.S.I. Minas – UPM, Madrid.

ANEJO I : PANTALLAS EN VOLADIZO

En el presente anejo se muestran los valores obtenidos a través del programa Plaxis y las principales gráficas utilizadas en la determinación del ángulo previo a la inestabilidad del conjunto pantalla-terreno.

La nomenclatura utilizada en las tablas responde al siguiente significado:

- \emptyset : ángulo de rozamiento interno implementado en Plaxis.
- Tangente: tangente del ángulo de rozamiento interno.
- U: desplazamiento horizontal en la cabeza de pantalla.
- M: momento máximo en la pantalla.
- SumStage: porcentaje de la carga total aplicada en el cálculo.
- Pasos: número total de pasos de cálculo empleado por Plaxis hasta alcanzar resultado.
- Estado: situación final obtenida, si se alcanza convergencia se indica con "Ok" y "Col" cuando el terreno alcanza rotura.
- Etapas: número de fases de excavación consideradas en el análisis.

Las gráficas mostradas se han utilizado para llevar a cabo la comprobación de la bondad del ángulo adoptado como previo a rotura.

- Gráfica desplazamiento horizontal-ángulo de rozamiento: se comprueba que el desplazamiento tiende a ser vertical con la disminución del ángulo de rozamiento.
- Gráfica (1-SumStage)-ángulo de rozamiento: se comprueba que el error en la aplicación final de la carga aumenta a medida que disminuye el ángulo de rozamiento y se dificulta la obtención de convergencia.

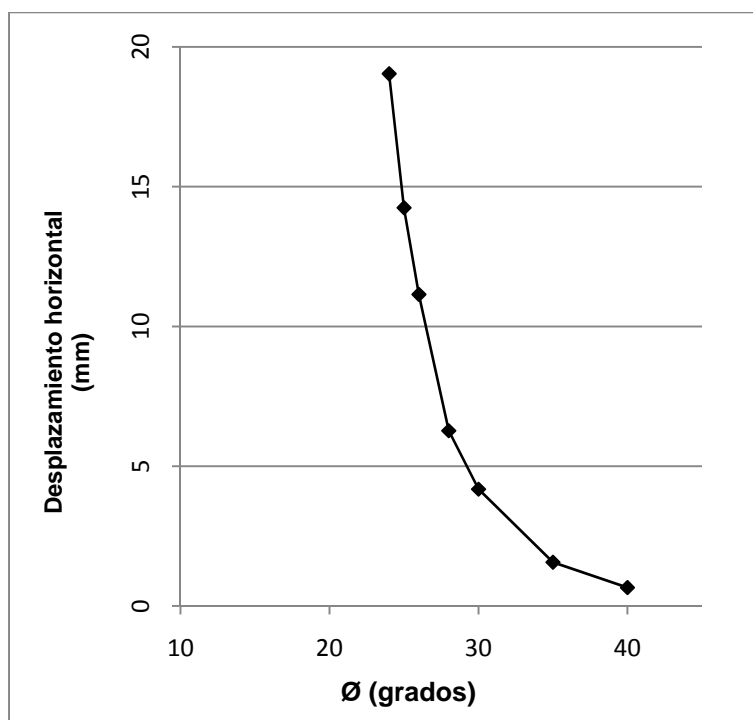
Caso: Pantalla en voladizo de 3 m de alzado y 3 m de clava (Vh3d3)

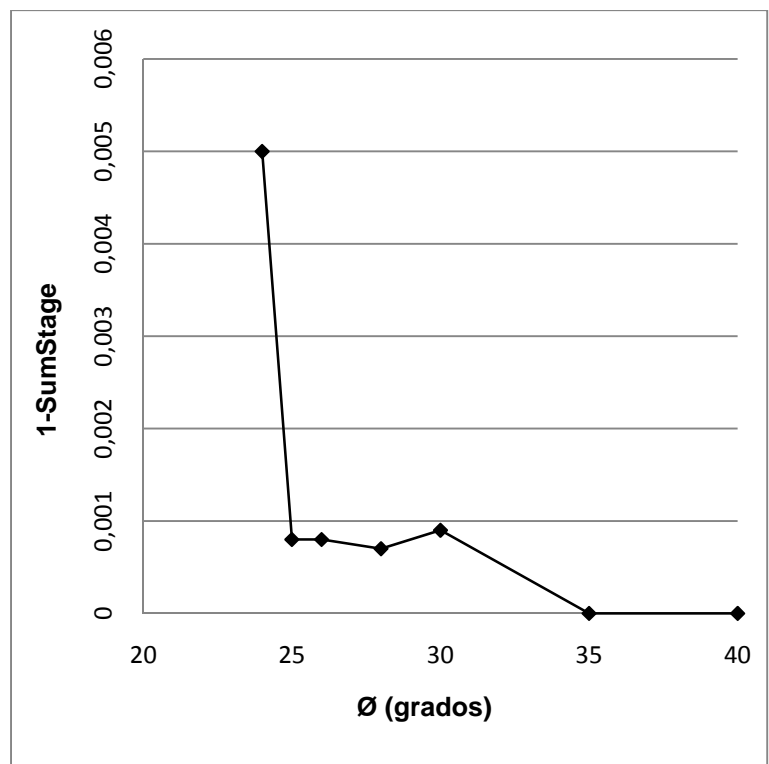
Resultados obtenidos del programa Plaxis

Ø (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
40	0,83909963	0,6577	18,34	1	42	ok	0
35	0,70020754	1,565	25,38	1	53	ok	0
30	0,57735027	4,178	35,31	0,9991	106	ok	0,0009
28	0,53170943	6,269	40,55	0,9993	141	ok	0,0007
26	0,48773259	11,146	47,51	0,9992	198	ok	0,0008
25	0,46630766	14,247	51,62	0,9992	225	ok	0,0008
24	0,44522869	19,043	55,12	0,995	294	col	0,005
23	0,42447482	18,046	53,08	0,9646	241	col	0,0354

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

Ø (grados)	etapas	Obs.	Ux (10-3 m)	M (kNm)	SumStage
24	2	col	18,239	55,79	0,9927
	3	col	18,331	55,14	0,9903
	6	col	16,87	54,53	0,9573





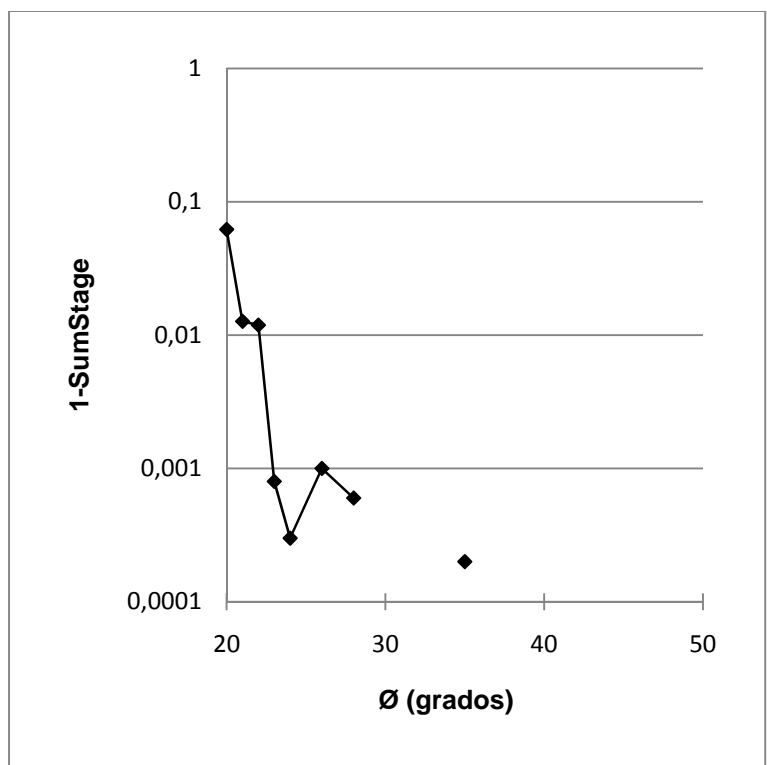
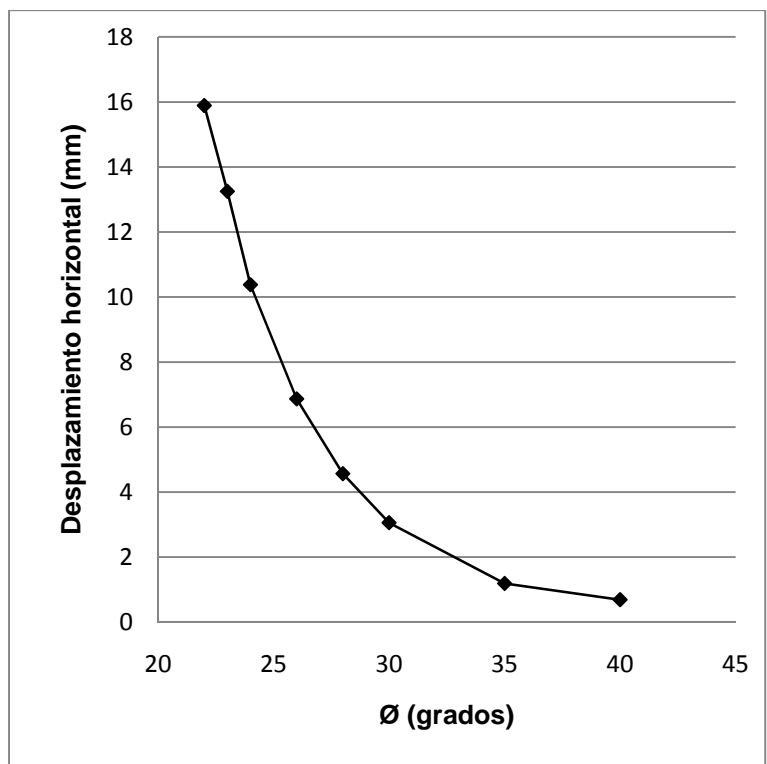
Caso: Pantalla en voladizo de 3 m de alzado y 3,6 m de clava (Vh3d3,6)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

Ø (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
40	0,839	0,69	18,75	1	37	ok	0
35	0,700	1,19	24,91	0,9998	53	ok	0,0002
30	0,577	3,058	35,8	1	74	ok	0
28	0,532	4,566	41,36	0,9994	106	ok	0,0006
26	0,488	6,867	48,55	0,999	145	ok	0,001
24	0,445	10,378	57,03	0,9997	194	ok	0,0003
23	0,424	13,25	61,88	0,9992	225	ok	0,0008
22	0,404	15,891	67,89	0,9995	-	ok	0,0119
21	0,384	21,048	71,02	0,9873	292	col	0,0127
20	0,364	16,656	64,9	0,9379	222	col	0,0621

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

Ø (grados)	etapas	Obs.	U (10-3 m)	M (kNm)	SumStage
22	1	col	15,822	65,02	0,9881
	2	col	15,613	67,13	0,995
	3	ok	15,891	67,89	0,9995
	6	ok	15,909	67,96	1
21	2	col	20,699	71,97	0,9838
	3	col	14,682	64,94	0,9064
	6	col	18,173	70,36	0,9092
20	2	col	16,556	65,63	0,8964
	3	col	14,011	62,55	0,8095
	6	col	23,52	73,96	0,8246



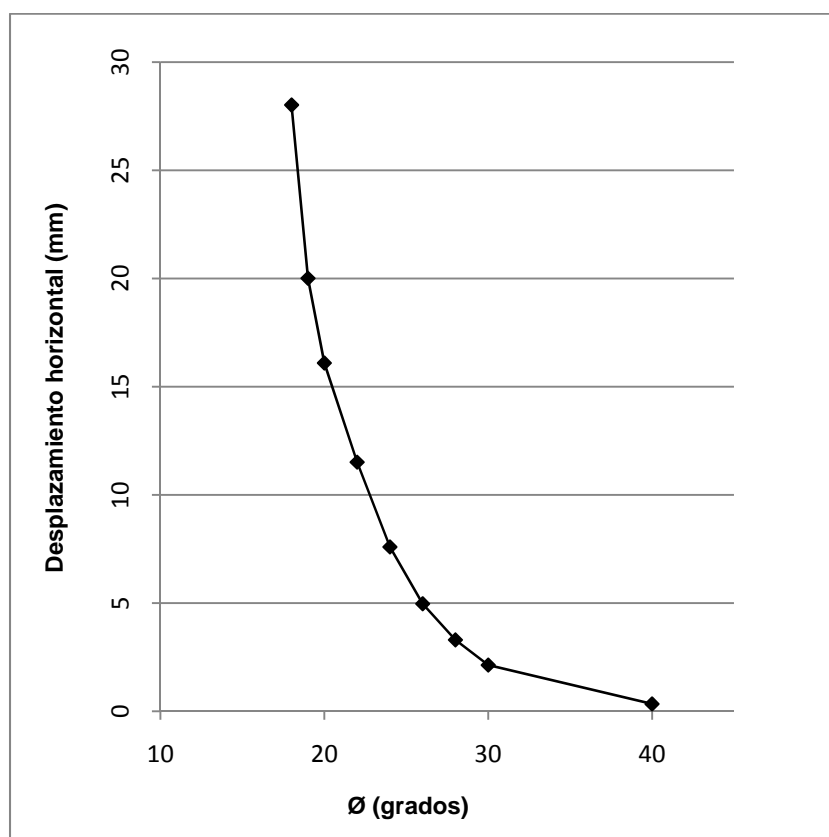
Caso: Pantalla en voladizo de 3 m de alzado y 4,5 m de clava (Vh3d4,5)

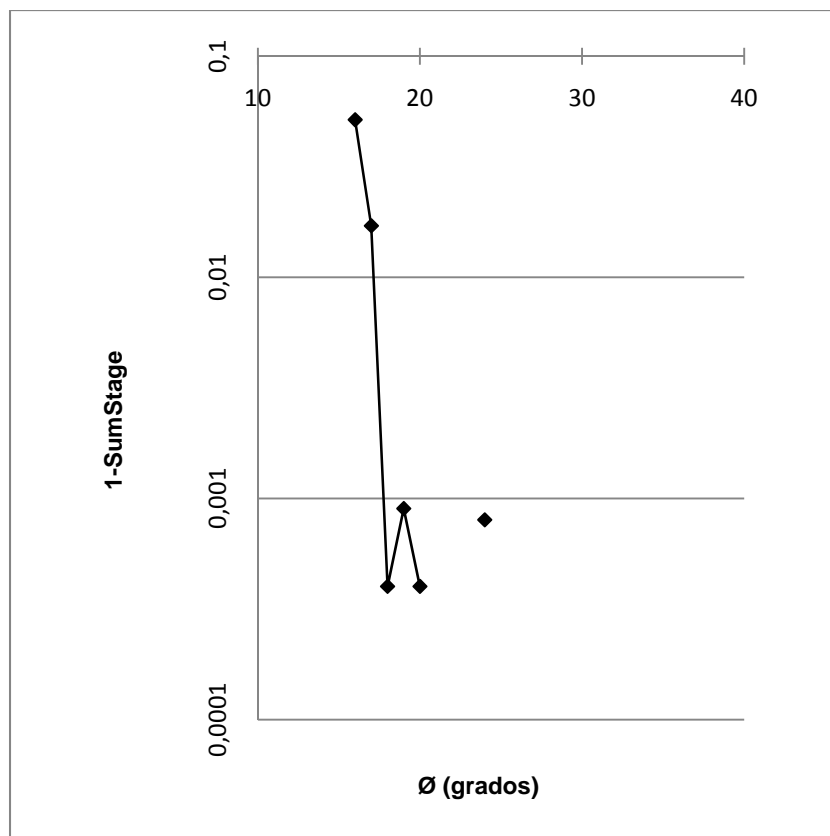
Resultados obtenidos del programa Plaxis

Ø (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
40	0,83909963	0,3408	19,56	1	44	ok	0
30	0,57735027	2,138	35,85	1	58	ok	0
28	0,53170943	3,303	41,69	1	70	ok	0
26	0,48773259	4,97	48,48	1	90	ok	0
24	0,44522869	7,595	56,85	0,9992	126	ok	0,0008
22	0,40402623	11,513	68,74	1	162	ok	0
20	0,36397023	16,093	83,33	0,9996	160	ok	0,0004
19	0,34432761	20,009	92,25	0,9991	225	ok	0,0009
18	0,3249197	28,018	104,47	0,9996	248	ok	0,0004
17	0,30573068	37,099	108,92	0,9829	311	col	0,0171
16	0,28674539	40,869	107,44	0,9484	320	col	0,0516

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

Ø (grados)	etapas	Obs.	U (10-3 m)	M (kNm)	SumStage
17	2	col	19,612	91,03	0,8833
	3	col	20,734	94,4	0,8459
	6	col	38,308	111,13	0,9185





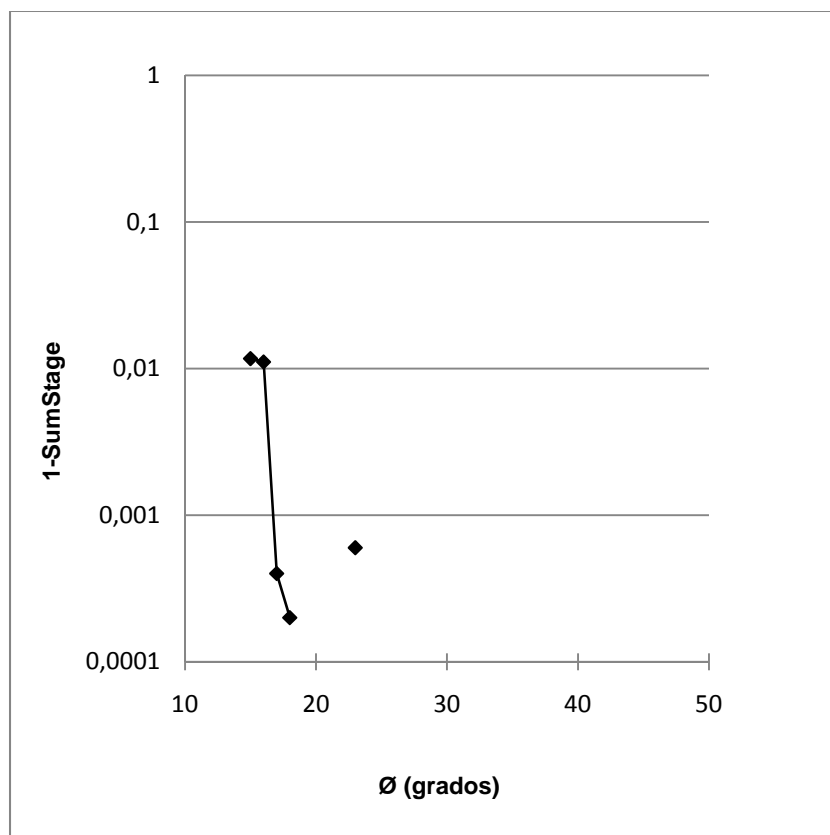
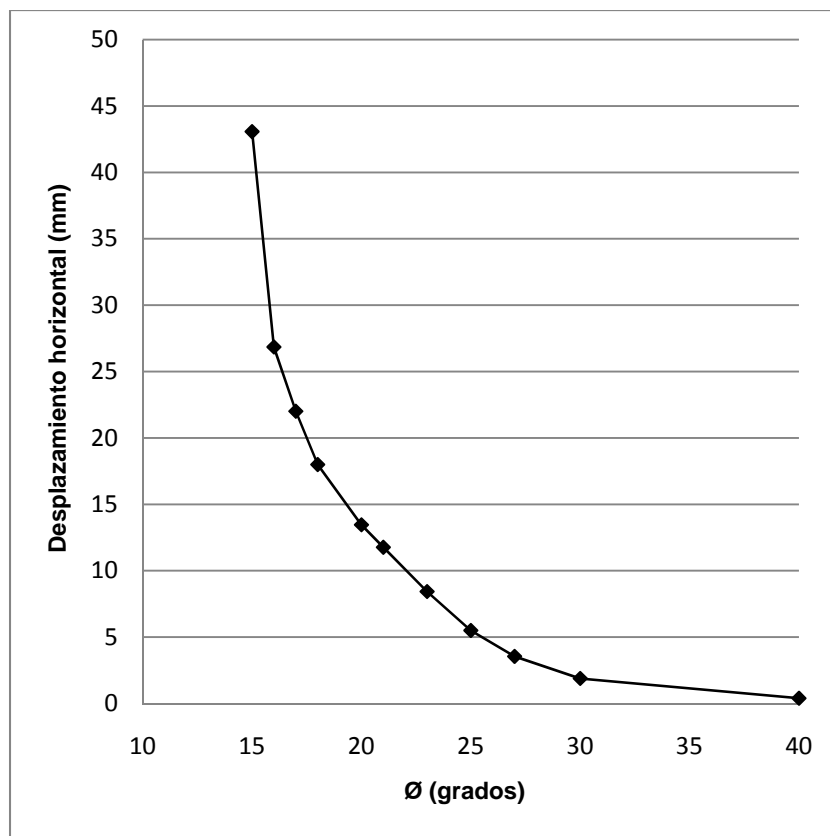
Caso: Pantalla en voladizo de 3 m de alzado y 5,4 m de clava (Vh3d5,4)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

Ø (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
40	0,83909963	0,3933	19,65	1	36	ok	0
30	0,57735027	1,885	35,9	1	52	ok	0
27	0,50952545	3,548	45,57	1	70	ok	0
25	0,46630766	5,5	53,2	1	94	ok	0
23	0,42447482	8,432	62,84	0,9994	154	ok	0,0006
21	0,38386404	11,764	75,8	1	153	ok	0
20	0,36397023	13,458	83,39	1	140	ok	0
18	0,3249197	17,997	104,4	0,9998	150	ok	0,0002
17	0,30573068	22,012	117,03	0,9996	196	ok	0,0004
16	0,28674539	26,849	127,69	0,9889	221	col	0,0111
15	0,26794919	43,073	144,76	0,9883	281	col	0,0117
14	0,249328	47,734	141,96	0,9485	313	col	0,0515

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

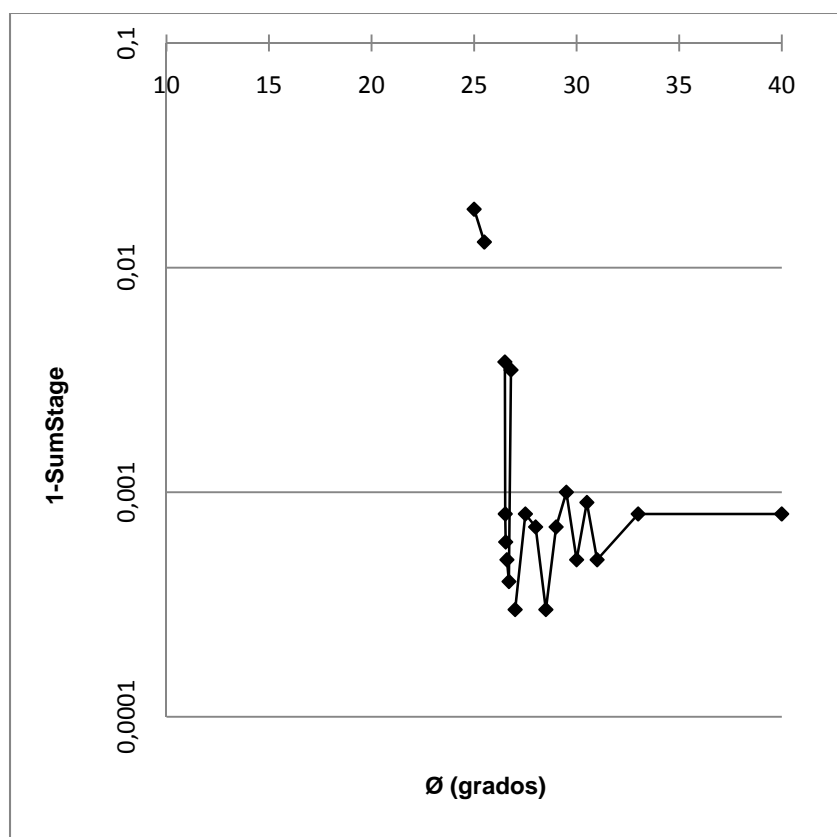
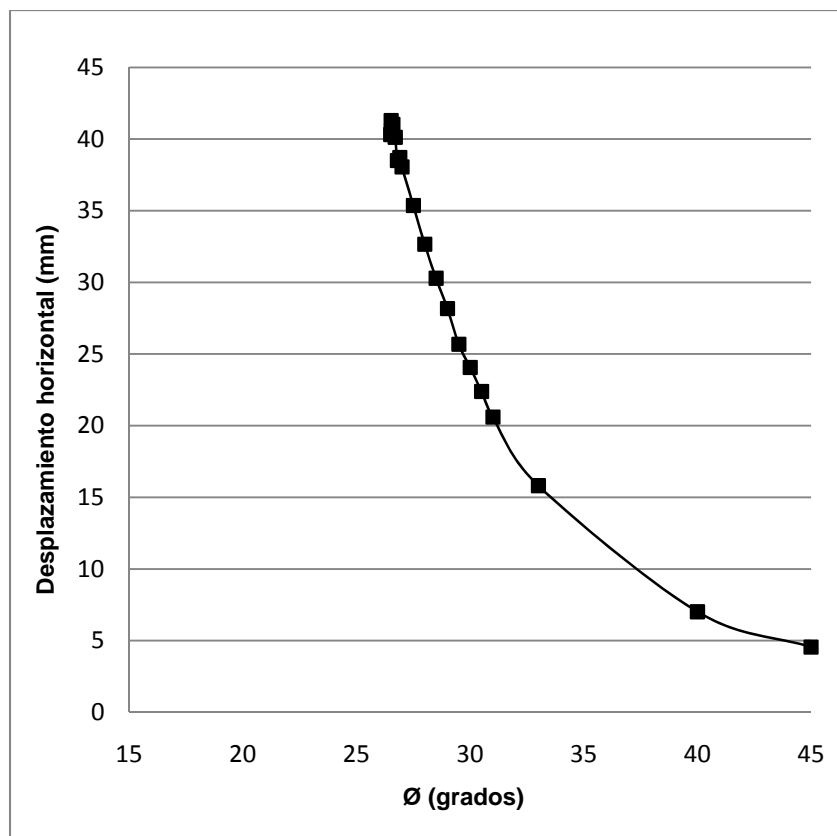
Ø (grados)	etapas	Obs.	U (10-3 m)	M (kNm)	SumStage
16	2	col	25,688	128,32	0,9918
	3	ok	27,391	132,63	0,9997
	6	ok	27,154	132,83	1
15	2	col	30,636	133,23	0,9388
	3	col	51,085	150,96	0,9963
	6	col	-	-	0,4834



Caso: Pantalla en voladizo de 5 m de alzado y 5 m de clava (Vh5d5)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

Ø (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
45	1	4,552	66,03	0,9991	196	ok	0,0009
40	0,83909963	7,014	83,23	0,9992	172	ok	0,0008
33	0,64940759	15,814	128,38	0,9992	211	ok	0,0008
31	0,60086062	20,6	147,43	0,9995	269	ok	0,0005
30,5	0,58904502	22,386	153,7	0,9991	276	ok	0,0009
30	0,57735027	24,059	159,47	0,9995	305	ok	0,0005
29,5	0,56577278	25,679	164,55	0,999	296	ok	0,001
29	0,55430905	28,174	173,14	0,9993	301	ok	0,0007
28,5	0,5429557	30,287	179,61	0,9997	335	ok	0,0003
28	0,53170943	32,664	186,52	0,9993	338	ok	0,0007
27,5	0,52056705	35,363	194,16	0,9992	355	ok	0,0008
27	0,50952545	38,052	200,99	0,9997	389	ok	0,0003
26,9	0,50732896	38,713	203,18	1	382	ok	
26,8	0,50513635	38,504	202,25	0,9965	401	col	0,0035
26,7	0,5029476	40,123	206,51	0,9996	374	ok	0,0004
26,6	0,5007627	41,026	208,71	0,9995	386	ok	0,0005
26,56	0,49988981	41,004	208,41	1	386	ok	
26,54	0,49945359	40,641	207	0,9994	391	ok	0,0006
26,52	0,49901752	41,296	208,94	0,9992	397	ok	0,0008
26,5	0,49858161	40,316	206,5	0,9962	367	col	0,0038
26	0,48773259	31,693	178,03	0,9513	320	col	
25,5	0,47697553	45,326	215	0,987	401	col	0,013
25	0,46630766	49,136	220,71	0,9818	423	col	0,0182



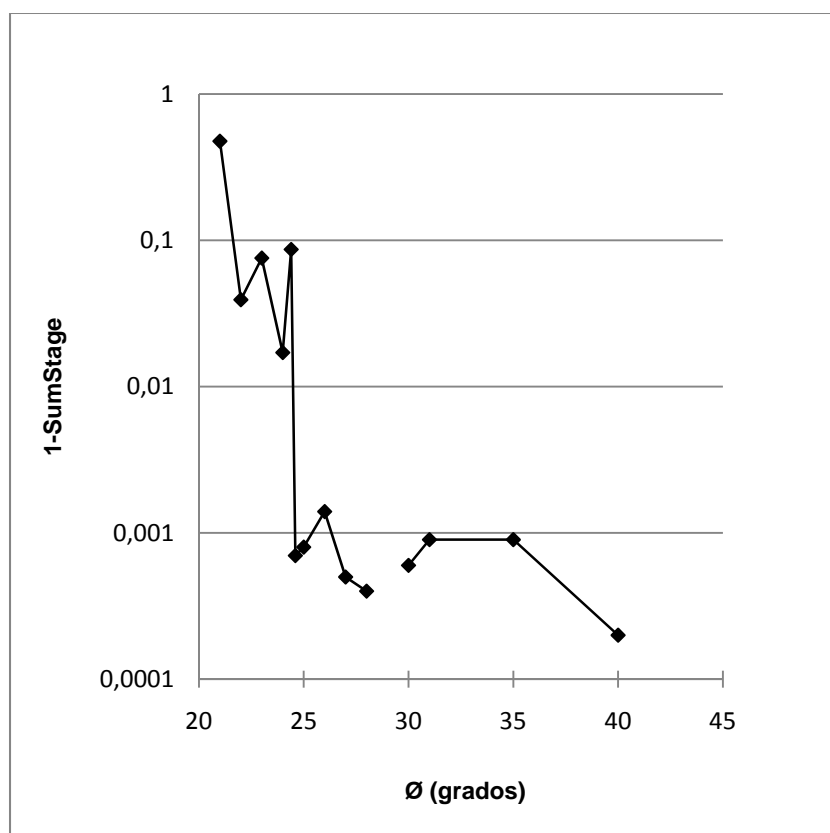
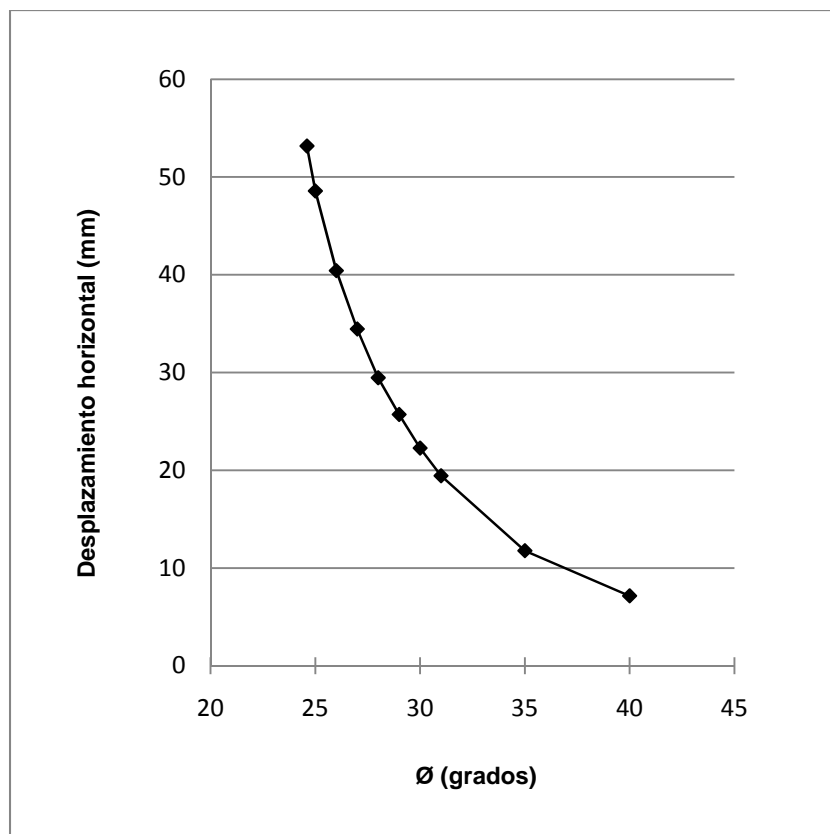
Caso: Pantalla en voladizo de 5 m de alzado y 5,5 m de clava (Vh5d5,5)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

Ø (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
40	0,83909963	7,147	83,84	0,9998	142	ok	0,0002
35	0,70020754	11,765	110,64	0,9991	184	ok	0,0009
31	0,60086062	19,431	147,33	0,9991	276	ok	0,0009
30	0,57735027	22,265	159,55	0,9994	257	ok	0,0006
29	0,55430905	25,706	172,39	1	312	ok	0
28	0,53170943	29,461	184,31	0,9996	300	ok	0,0004
27	0,50952545	34,455	199,79	0,9995	357	ok	0,0005
26	0,48773259	40,421	216,69	0,9986	365	col	0,0014
25	0,46630766	48,574	236,65	0,9992	406	ok	0,0008
24,6	0,45783575	53,175	247,13	0,9993	443	ok	0,0007
24,4	0,45362012	30,453	172,967	0,9133	336	col	0,0867
24	0,44522869	52,305	242,42	0,9829	476	col	0,0171
23	0,42447482	41,748	206,51	0,9243	363	col	0,0757
22	0,40402623	66,463	265,23	0,9607	476	col	0,0393
21	0,38386404	8,349	67,07	0,5233	288	col	0,4767

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

Ø (grados)	etapas	Obs.	U (10-3 m)	SumStage
24	2	Col		
	5	No resultado		
	10	col		
24,6	5	Col. En 5	40,5	0,8564
25	5	Ok	47,293	0,9995



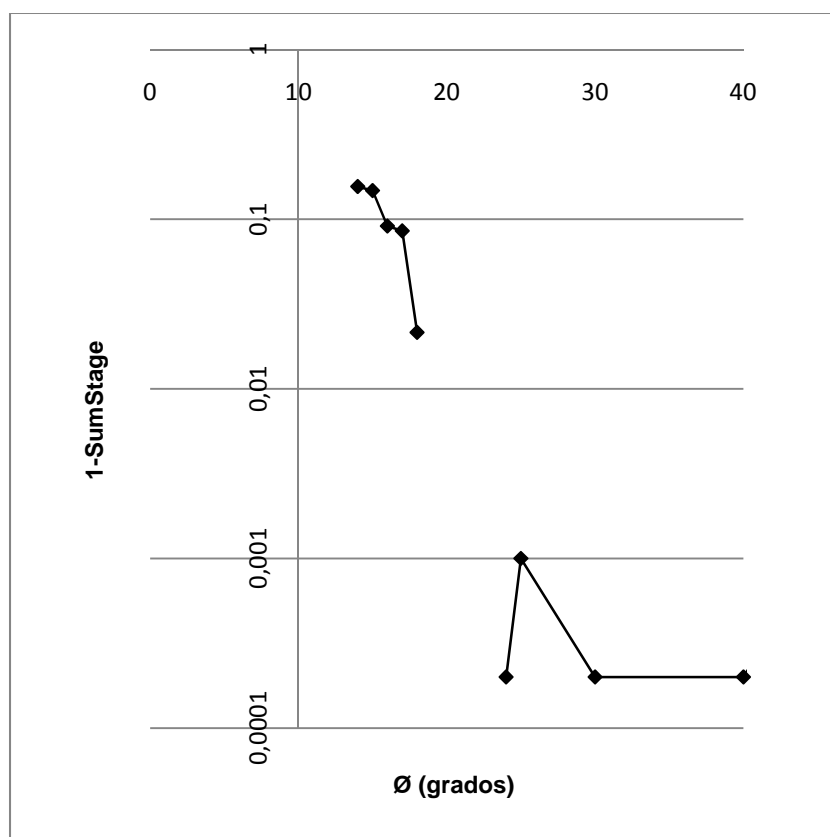
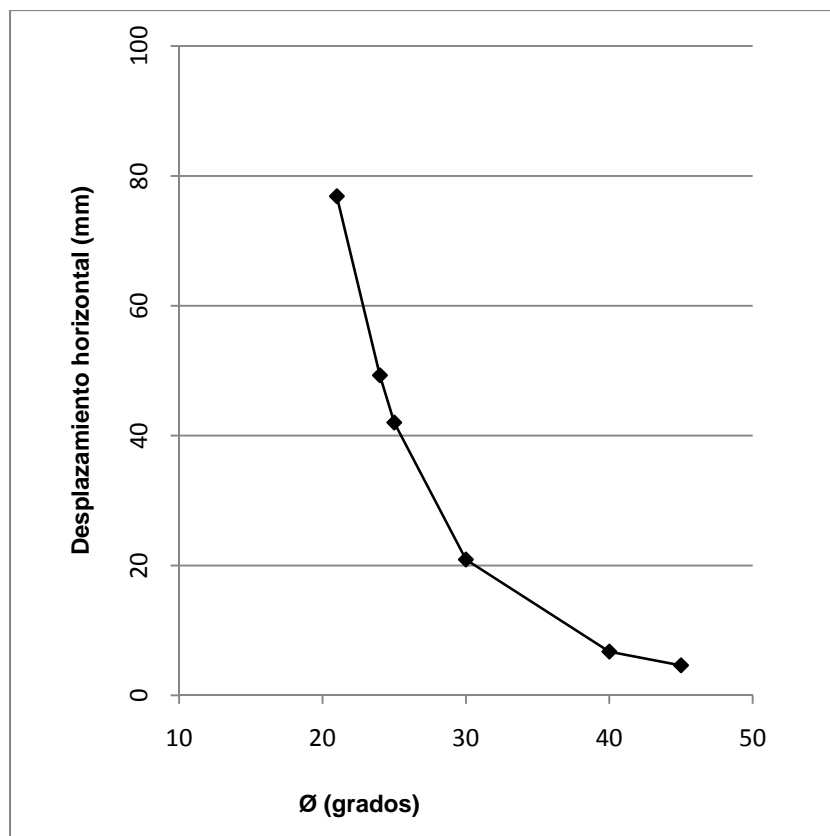
Caso: Pantalla en voladizo de 5 m de alzado y 7,5 m de clava (Vh5d7,5)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

Ø (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
45	1	4,62	64,2	0,999	165	ok	0,001
40	0,83909963	6,73	81,25	0,9998	156	ok	0,0002
30	0,57735027	20,91	156,58	0,9998	284	ok	0,0002
25	0,46630766	42,01	234,61	0,999	443	ok	0,001
24	0,44522869	49,29	258,92	0,9998	-	ok	0,0002
21	0,38386404	76,87	346,78	1	-	ok	0
18	0,3249197	-	-	0,9785	604	col	0,0215
17	0,30573068	-	-	0,9147	548	col	0,0853
16	0,28674539	-	-	0,9089	573	col	0,0911
15	0,26794919	-	-	0,8526	559	col	0,1474
14	0,249328	-	-	0,8442	624	col	0,1558
13	0,23086819	-	-	0,5658	184	col	0,4342

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

Ø (grados)	etapas	Obs.	U (10-3 m)	M (kNm)	SumStage
24	1	ok	49,29	447	0,9998
	2	col			0,979
	5	col			
	10	col			
23	1	col	49,31	252,64	0,9738
	2	col			
	5	ok		1	
	10	col			
22	1	col			0,9471
	2	col			0,9605
	5	col			
	10	col			
21	1	col	52,17	52,18	0,9267
	2	ok	76,87	346,78	1
	5	col			
	10	col			
20	1	col	88,22	356,13	0,9814
	2	col			
	5	col			
	10	col			



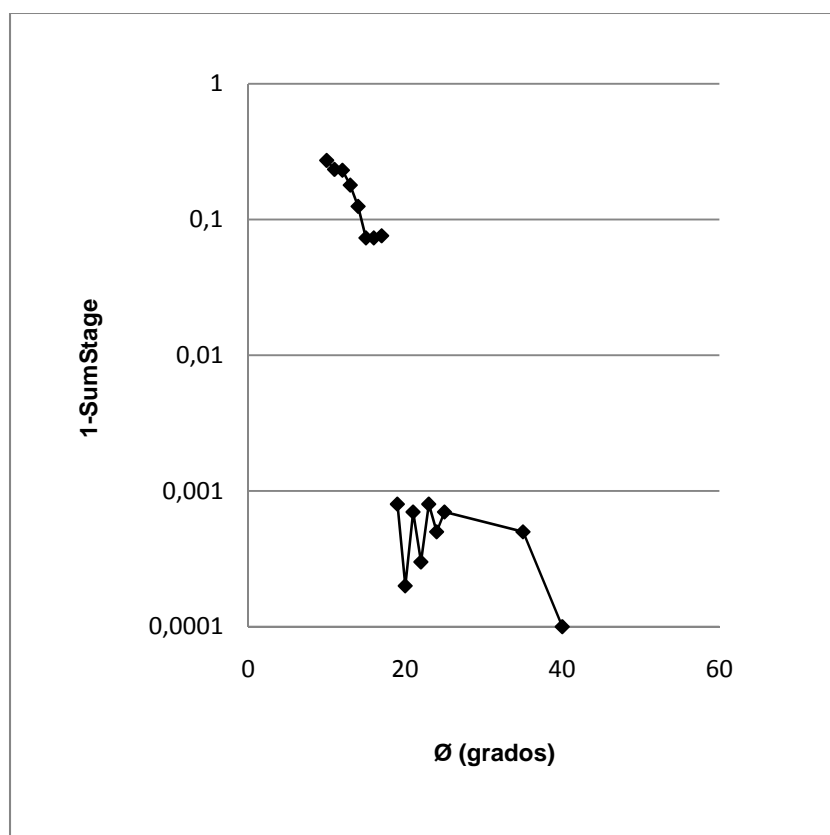
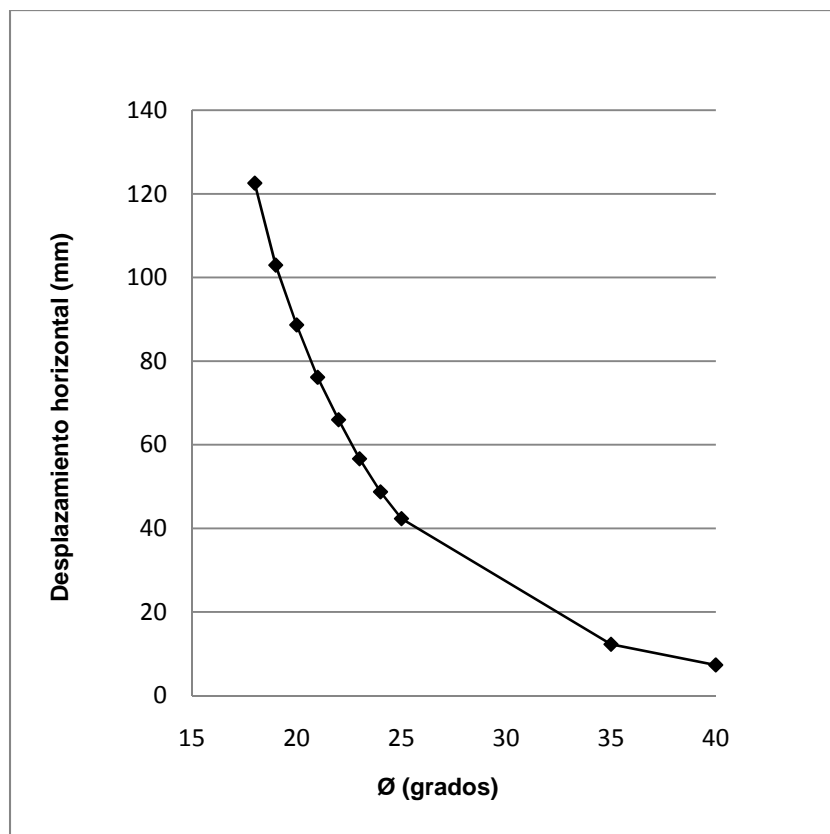
Caso: Pantalla en voladizo de 5 m de alzado y 9 m de clava (Vh5d9)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

Ø (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
40	0,83909963	7,32	88,37	0,9999	155	ok	1E-04
35	0,70020754	12,28	113,02	0,9995	175	ok	0,0005
25	0,46630766	42,32	236,69	0,9993	405	ok	0,0007
24	0,44522869	48,73	258,1	0,9995	453	ok	0,0005
23	0,42447482	56,65	283,97	0,9992	495	ok	0,0008
22	0,40402623	65,99	313,32	0,9997	495	ok	0,0003
21	0,38386404	76,14	344,9	0,9993	-	ok	0,0007
20	0,36397023	88,66	384,36	0,9998	-	ok	0,0002
19	0,34432761	102,96	428,45	0,9992	-	ok	0,0008
18	0,3249197	122,58	479,13	1	-	ok	0
17	0,30573068	-	-	0,9242	-	col	0,0758
16	0,28674539	-	-	0,9269	-	col	0,0731
15	0,26794919	-	-	0,9269	-	col	0,0731
14	0,249328	-	-	0,8752	-	col	0,1248
13	0,23086819	-	-	0,8209	-	col	0,1791
12	0,21255656	-	-	0,7697	-	col	0,2303
11	0,19438031	-	-	0,7662	-	col	0,2338
10	0,17632698	-	-	0,7278	-	col	0,2722

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

Ø	etapas	Obs.	Ux	M	SumStage
21	1	ok	76,14	344,9	0,9993
	2	col	-	-	0,848
	5	col	-	-	0,9723
	10	col	-	-	0,8677
20	1	col	76,37	343,8	0,9728
	2	ok	88,66	384,36	0,9998
	5	col	-	-	0,9152
	10	col	-	-	0,9936
19	1	-	-	-	-
	2	ok	104,02	428,72	0,9996
	5	ok	102,96	428,45	0,9992
	10	ok	102,72	428,03	1
18	1	col	-	-	0,7556
	2	col	-	-	0,9667
	5	ok	123,11	480,23	0,9997
	10	ok	122,58	479,13	1
17	1	col	-	-	0,9242
	2	col	-	-	0,9641
	5	col	-	-	0,9201



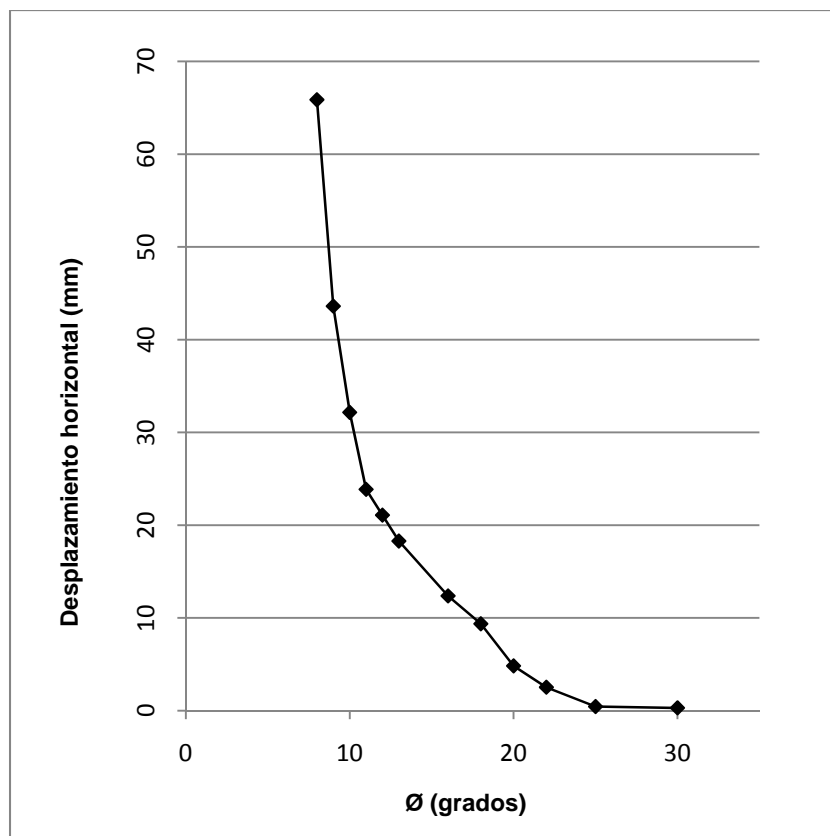
Caso: Pantalla en voladizo de 5 m de alzado y 7,5 m de clava con 10 kPa de cohesión (Vh5d7,5c10)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

Ø (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
30	0,57735027	0,3	20,47	1,0309	4	ok	-0,0309
25	0,46630766	0,447	18,09	1,0373	4	ok	-0,0373
22	0,40402623	2,526	29,92	1	26	ok	0
20	0,36397023	4,829	40,42	1	37	ok	0
18	0,3249197	9,367	53,68	1	52	ok	0
16	0,28674539	12,373	61,61	1	47	ok	0
13	0,23086819	18,289	83,21	1	59	ok	0
12	0,21255656	21,082	95,21	1	35	ok	0
11	0,19438031	23,863	115,47	1		ok	0
10	0,17632698	32,16	139,03	1		ok	0
9	0,15838444	43,613	171,9	1		ok	0
8	0,14054083	65,869	211,19	1		ok	0

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

Ø (grados)	etapas	Obs.	U (10-3 m)	M (kNm)	SumStage
14	2	ok	14,725	69,22	1
	5	ok	14,662	74,1	1
	10	col	10,875	57,93	0,6893
11	2	ok	24,193	112,97	1
	5	ok	23,863	115,47	1
	10	col	-	-	-
10	1	ok	30,105	129,05	1
	2	ok	32,16	139,03	1
	5	ok	31,301	137,76	
	10	col	-	-	-
9	1	ok	41,895	165,38	0,9996
	2	ok	43,613	171,9	1
	5	ok	41,698	166,49	1
	10	col	-	-	-
8	1	ok	68,244	215,91	1
	2	ok	65,869	211,19	1
	5	ok	63,815	207,14	1
	10	col	-	-	-
7	1	col			
	2	col			0,9753
	5	col			0,9438
	10	col			



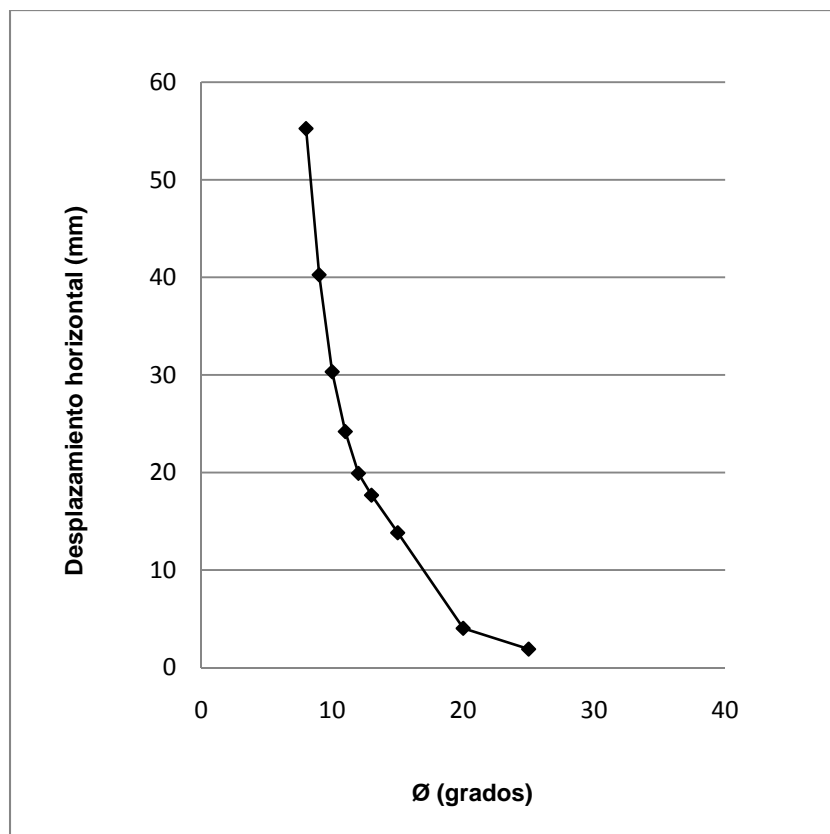
Caso: Pantalla en voladizo de 5 m de alzado y 9 m de clava con 10 kPa de cohesión (Vh5d9c10)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

\emptyset (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
25	0,46630766	1,896	27	1	26	ok	0
20	0,36397023	4,029	38,55	1	58	ok	0
15	0,26794919	13,821	71,54	1	73	ok	0
13	0,23086819	17,673	85,46	1	38	ok	0
12	0,21255656	19,908	94,09	1	48	ok	0
11	0,19438031	24,193	112,97	1	-	ok	0
10	0,17632698	30,32	138,55	1	-	ok	0
9	0,15838444	40,26	167,49	0,9994	-	ok	0,0006
8	0,14054083	55,25	207,36	0,9994	-	ok	
7	0,12278456						

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

\emptyset (grados)	etapas	Obs.	U (10-3 m)	M (kNm)	SumStage
11	1	col	9,185	50,8	0,8636
	2	ok	24,193	112,97	1
	5	ok	23,863	115,47	1
	10	col	-	-	-
10	1	col	9,869		
	2	ok	31,141	139,49	1
	5	ok	30,32	138,55	1
	10	ok	29,616	136,9	1
9	1	col			
	2	ok	40,26	167,49	0,9994
	5	ok	39,68	166,92	1
	10	col	-	-	-
8	2	ok	57,39	212,65	1
	5	ok	55,25	207,36	0,9994
	10	col	-	-	-
7	2	ok	88,365	269,8	1
	5	ok	85,887	264,56	1
	10	col	-	-	-
6	2	col	-	-	0,9656
	5	col	-	-	0,9151
	10	col	-	-	-



Caso: Análisis del efecto de cohesión con pantalla de 5 m de alzado y 7,5 m de clava

C'	Ø	Estado
0	21	ok

C'	Ø	Estado
25	0	ok
24		ok
23		ok
22		ok
21		ok
20		col
18		col
17		col
16		col
15		col
14		col
13		col
12		col

C' (ari=0)	etapas	estado
22	1	ok
	2	ok
	5	ok
	10	col
21	1	ok
	2	ok
	5	ok
	10	col
20	1	col
	2	col
	5	col
	10	col
19	1	col
	2	col
	5	col
	10	col
18	1	col
	2	col
	5	col
	10	col
17	1	col
	2	col
	5	col
	10	col

C'	Ø	Estado
5	18	ok
	17	ok
	16	ok
	15	ok
	14	ok
	13	ok
	12	col
	11	col

Ø (C'=15)	etapas	estado
7	1	col
	2	col
	5	ok
	10	col
6	1	col
	2	col
	5	ok
	10	col
5	1	col
	2	ok
	5	col
	10	col
4	1	col
	2	ok
	5	col
	10	col
3	1	col
	2	col
	5	col
	10	col
2	1	col
	2	col
	5	col
	10	col

C'	Ø	Estado
10	8	ok

C'	Ø	Estado
15	7	col
	6	col
	5	col
	4	col
	3	col
	2	col

Ø (C'=5)	etapas	estado
15	1	ok
	2	ok
	5	ok
	10	ok
14	1	ok
	2	ok
	5	ok
	10	col
13	1	ok
	2	ok
	5	ok
	10	col
12	1	col
	2	col
	5	col
	10	col
11	1	col
	2	col
	5	col
	10	col
10	1	col
	2	col
	5	col
	10	col

Caso: Pantalla en voladizo de 5 m de alzado y 7,5 m de clava con carga exterior (Vh5d7,5-Q)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

\emptyset (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
40	0,83909963	-	-	-	-	col	
35	0,70020754	28,43	217,6	0,9999	103	ok	1E-04
33	0,64940759	38,494	262,68	0,9993	124	ok	0,0007
32	0,62486935	42,083	276,71	0,9999	107	ok	1E-04
31	0,60086062	48,509	304,37	0,9993	106	ok	0,0007
30	0,57735027	54,112	328,112	1	-	ok	0,0018
29	0,55430905	62,983	361,89	1	98	ok	0,0361
28	0,53170943				-	col	0,0276

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

\emptyset (grados)	etapas	Obs.	U (10-3 m)	M (kNm)	SumStage
30	1	col	56,193	333,88	0,9982
	2	ok	56,07	333,09	0,9991
	5	ok	54,112	328,112	1
	10	ok	53,666	327,71	0,9995
29	1	col	54,514	321,36	0,9639
	2	ok	64,377	364,5	0,999
	5	ok	62,983	361,89	1
	10	col	52,383	321,04	0,6209
28	1	col	66,116	366,34	0,9724
	2	ok	75,614	401,41	1
	5	col	-	-	0,7531
	10	col	-	-	0,6637

Caso: Pantalla en voladizo de 5 m de alzado y 9 m de clava con carga exterior (Vh5d9-Q)

Resultados obtenidos del programa Plaxis

\emptyset (grados)	tangente	U (10-3 m)	M (kNm)	SumMstage	Pasos	estado	1-SumStage
45	1	8,297	116,76	0,9991	117	ok	0,0009
40	0,83909963	16,598	163,6	0,9993	138	ok	0,0007
33	0,64940759	37,235	257,83	1	109	ok	0
31	0,60086062	49,026	307,83	0,9995	99	ok	0,0005
30	0,57735027	56,814	336,34	0,9999	129	ok	1E-04
29	0,55430905	65,389	366,33	1	107	ok	0
28	0,53170943	74,167	395,89	0,9993	130	ok	0,0007
26	0,48773259	100,766	480,27	0,9996	118	ok	0,0004
25	0,46630766	117,84	532,04	0,9997	125	ok	0,0003
24	0,44522869	137,975	588,86	0,9993	114	ok	0,0007
23	0,42447482	118,982	525,19	0,9376	111	col	0,0624
22	0,40402623	51,593	280,08	0,7236	57	col	0,2764

Estudio por etapas para determinación de no convergencia

\emptyset (grados)	etapas	Obs.	U (10-3 m)	M (kNm)	SumStage
23	2	col	-	-	-
	3	col	-	-	-
	6	col	-	-	-

ANEJO II: PANTALLAS ANCLADAS A UN NIVEL

En el presente anejo se muestran las tablas empleadas para la determinación del ángulo previo a rotura y las gráficas correspondientes a la evolución de la fuerza de anclaje según distintos análisis.

La nomenclatura utilizada en las tablas responde al siguiente significado:

- α_i : ángulo de rozamiento interno implementado en Plaxis.
- Etapa: fase de excavación correspondiente a una determinada profundidad.
- Profundidad: metros excavados en la correspondiente etapa.
- F_{anclaje}: fuerza en el anclaje al final de cada etapa.
- U_{cabeza}: desplazamiento horizontal en la cabeza de pantalla.
- U_{anclaje}: desplazamiento horizontal del punto de aplicación del anclaje.
- U_{pie}: desplazamiento horizontal del pie de pantalla.
- Colapso: convergencia no obtenida mediante Plaxis.
- Ss: porcentaje de carga total aplicada al final del cálculo.

La omisión de resultados en celdas significa que se no se ha considerado necesario utilizarlo en el análisis.

Caso: pantalla anclada de 10 m de alzado y 2,5 m de clava con 100% de fuerza de anclaje aplicada a 2m de superficie.						
ari	etapa	profundidad	Fanclaje	Ucabeza	Uanclaje	Upie
40	1	2	0	0,114	-0,057	-1,367
	2	2	138	0,871	0,777	-1,357
	3	4	139,3	1,257	0,721	-2,626
	4	6	140,7	1,351	0,302	-3,755
	5	8	141,4	0,994	-0,495	-4,494
	6	10	145,6	-2,688	-6,509	-4,065
37	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	2	138	0,851	0,766	-1,358
	3	4	139,3	1,22	0,684	-2,627
	4	6	140,7	1,259	0,211	-3,75
	5	8	141,4	0,748	-0,76	-4,343
	6	10	150,5	-6,704	-11,45	-4,294
36	Colapso					
35	Colapso					
34	Colapso					
33	Colapso					

Caso: pantalla anclada de 10 m de alzado y 2,5 m de clava con 200% de fuerza de anclaje aplicada a 2m de superficie.						
ari	etapa	profundidad	Fanclaje	Ucabeza	Uanclaje	Upie
37	1	2	0	0,075	-0,034	-1,367
	2	2	276	1,985	1,88	-1,356
	3	4	276,6	2,645	2,175	-2,627
	4	6	277,6	2,796	1,94	-3,755
	5	8	277,7	2,286	1,121	-4,351
	6	10	263	-2,123	-4,581	-4,121
35	1	2	0			
	2	2	276			
	3	4	276,6			
	4	6	277,6			
	5	8	277,4			
	6	10	260,7			
34	1	2	0			
	2	2	276			
	3	4	276,6			
	4	6	277,6			
	5	8	277,3			
	6	10	260,8			
33	1	2	0	-0,009	-0,085	-1,367
	2	2	276	2,119	1,938	-1,361
	3	4	276,6	2,767	2,21	-2,633
	4	6	277,6	2,807	1,871	-3,744
	5	8	277	1,935	0,668	-4,166
	6	10	257,9	-3,182	-8,813	-5,112
32	1	2	0			
	2	2	276			
	3	4	276,6			
	4	6	277,6			
	5	8	276,6			
	6	10	259,1			
31	1	2	0	-0,069	-0,12	-1,368
	2	2	276	2,217	1,982	-1,364
	3	4	276,6	2,847	2,232	-2,637
	4	6	277,6	2,806	1,826	-3,729
	5	8	275,9	1,484	0,061	-4,044
	6	10	258,2	-8,783	-14,822	-6,721
30	Colapso					
28	Colapso					

Caso: pantalla anclada de 10 m de alzado y 3 m de clava con 100% de fuerza de anclaje aplicada a 2m de superficie.						
ari	etapa	profundidad	Fanclaje	Ucabeza	Uanclaje	Upie
40	1	2		0,102	-0,062	-1,387
	2	2	138	0,859	0,771	-1,378
	3	4	139,3	1,221	0,697	-2,675
	4	6	140,8	1,309	0,27	-3,846
	5	8	141,5	0,977	-0,521	-4,703
	6	10	144,5	-1,587	-4,474	-4,494
37	1	2		0,063	-0,08	-1,387
	2	2	138	0,838	0,76	-1,378
	3	4	139,3	1,186	0,661	-2,675
	4	6	140,7	1,219	0,181	-3,844
	5	8	141,4	0,811	-0,725	-4,601
	6	10	148,4	-4,817	-9,109	-4,066
35	1	2		0,026	-0,097	-1,387
	2	2	138	0,814	0,746	-1,379
	3	4	139,3	1,143	0,62	-2,676
	4	6	140,7	1,13	0,096	-3,839
	5	8	141,5	0,519	-1,05	-4,453
	6	10	157,3	-9,773	-14,907	-4,249
34	1	2		0,003	-0,108	-1,387
	2	2	138	0,799	0,738	-1,379
	3	4	139,3	1,124	0,604	-2,677
	4	6	140,6	1,091	0,061	-3,835
	5	8	141,5	0,357	-1,232	-4,405
	6	10	160,7	-11,763	-17,231	-4,307
33	1	2		-0,022	-0,12	-1,387
	2	2	138	0,783	0,729	-1,379
	3	4	139,4	1,093	0,575	-2,677
	4	6	140,6	1,039	0,014	-3,831
	5	8	141,5	0,055	-1,585	-4,346
	6	10	165,7	-14,971	-20,785	-4,435
32	1	2		-0,05	-0,133	-1,388
	2	2	138	0,765	0,719	-1,379
	3	4	139,4	1,066	0,553	-2,678
	4	6	140,6	0,998	-0,019	-3,827
	5	8	141,5	-0,262	-1,99	-4,266
	6	10	169,3	-18,413	-24,594	-4,471
30	1	2		-0,121	-0,164	-1,388
	2	2	138	0,72	0,695	-1,38
	3	4	139,4	1,004	0,509	-2,679
	4	6	140,6	0,806	-0,193	-3,8
	5	8	142,3	-2,266	-4,566	-3,965

	6	10	182,3	-27,534	-34,741	-5,424
29	Colapso					
28	Colapso					
26	Colapso					
25	Colapso					

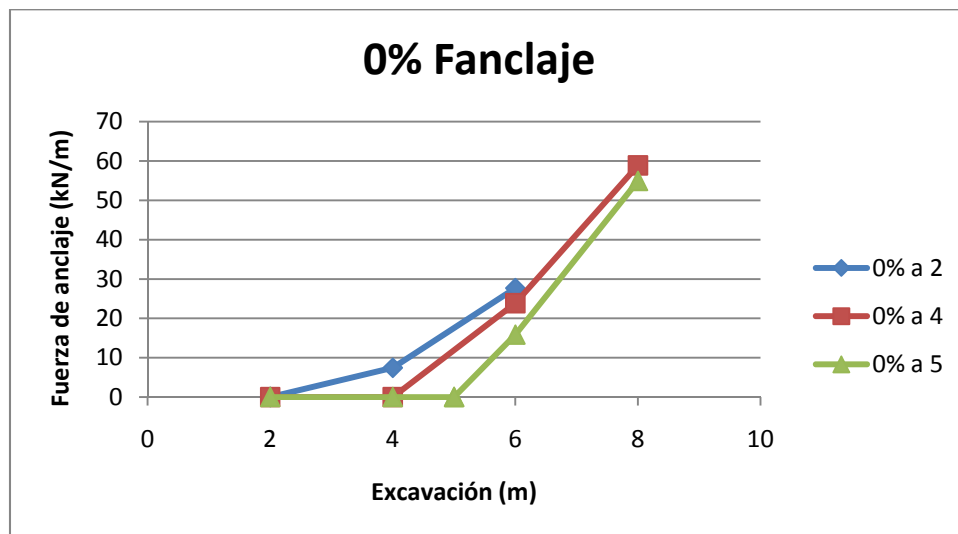
Caso: pantalla anclada de 10 m de alzado y 3 m de clava con 200% de fuerza de anclaje aplicada a 2m de superficie.						
ari	etapa	profundidad	Fanclaje	Ucabeza	Uanclaje	Upie
37	1	2	0	0,063	-0,042	-1,387
	2	2	276	1,973	1,873	-1,376
	3	4	276,6	2,612	2,156	-2,674
	4	6	277,6	2,758	1,913	-3,848
	5	8	277,7	2,341	1,16	-4,066
	6	10	267,3	1,349	-1,649	-4,244
34	1	2	0			
	2	2	276			
	3	4	276,6			
	4	6	277,6			
	5	8	277,4			
	6	10	260,7			
32	1	2	0	-0,05	-0,109	-1,388
	2	2	276	2,145	1,948	-1,382
	3	4	276,6	2,766	2,195	-2,682
	4	6	277,5	2,744	1,822	-3,836
	5	8	276,8	1,896	0,547	-4,336
	6	10	257,6	-1,863	-7,678	-4,973
30	1	2	0			
	2	2	276			
	3	4	276,6			
	4	6	277,5			
	5	8	274,8			
	6	10	254,3			
28	1	2	0	-0,228	-0,212	-1,388
	2	2	276	2,377	2,05	-1,391
	3	4	276,6	2,953	2,244	-2,693
	4	6	277,2	2,522	1,477	-3,71
	5	8	271	1,072	-1,072	-4,035
	6	10	256,6	-15,44	-24,077	-8,571
27	Colapso					
26	Colapso					
25	Colapso					

Caso: Pantalla anclada de 10 m de alzado y 2,5 m de clava. Aplicación de distinta fuerza de anclaje a diferente profundidad para ángulo estricto .							
ari	etapa	ss	profundidad	Fanclaje	Ucabeza	Uanclaje	Upie
37 (100% a 2m)	1	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	1	2	138	0,851	0,766	-1,358
	3	1	4	139,3	1,22	0,684	-2,627
	4	1	6	140,7	1,259	0,211	-3,75
	5	1	8	141,4	0,748	-0,76	-4,343
	6	1	10	150,5	-6,704	-11,45	-4,294
37 (100% a 4m)	1	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	1	4	0	-3,774	-2,522	-2,635
	3	1	4	138	-2,712	-1,436	-2,627
	4	1	6	139,3	-1,855	-2580	-3,748
	5	1	8	140,6	-3,024	-2,997	-4,296
	6	0,9727	10	150	-8,844	-13,077	-3,993
37 (100% a 5m)	1	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	1	4	0	-3,774	-2,522	-2,635
	3	0,9992	5	0	-11,484	-7,943	-3,215
	4	1	5	138	-10,353	-6,781	-3,21
	5	1	6	138,7	-10,37	-7,099	-3,732
	6	1	8	139,7	-10,282	-8,248	-4,205
	7	0,9996	10	150,5	-16,859	-19,851	-3,843
37 (50% a 2m)	1	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	1	2	69	0,432	0,333	-1,362
	3	1	4	70,75	0,637	-0,01	-2,63
	4	1	6	72,28	0,644	-0,41	-3,749
	5	1	8	77,42	-4,225	-2,582	-0,976
	6	0,9998	10	127,6	-19,643	-22,893	-3,948
37 (50% a 4m)	1	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	1	4	0	-3,774	-2,522	-2,635
	3	1	4	69	-3,273	-1,988	-2,631
	4	1	6	70,97	-3,227	-2,581	-3,745
	5	1	8	79,88	-4,992	-5,545	-4,199
	6	1	10	128,9	-23,902	-16,395	-4,01
37 (50% a 5m)	1	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	1	4	0	-3,774	-2,522	-2,635
	3	0,9992	5	0	-11,484	-7,943	-3,215
	4	1	5	69	-10,949	-7,37	-3,212
	5	1	6	69,97	-10,959	-7,751	-3,732
	6	1	8	81,81	-12,672	-11,275	-4,096
	7	0,9457	10	122,9	-	-	-

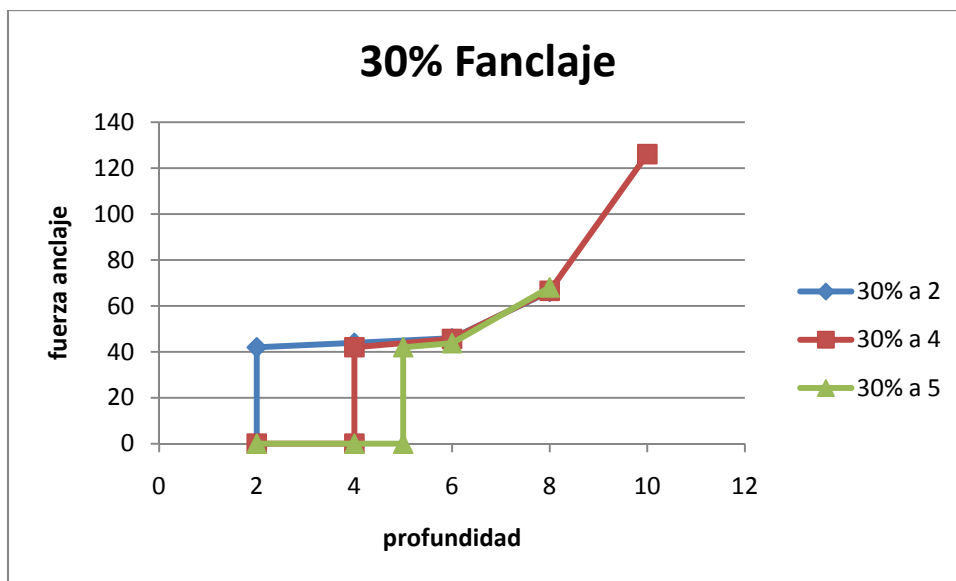
37 (30% a 2m)	1	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	1	2	42	0,29	0,174	-1,364
	3	1	4	43,92	0,423	-0,12	-2,631
	4	1	6	45,93	0,306	-0,749	-3,762
	5	0,9994	8	66,21	-4,932	-6,064	-4,183
	6	0,8587	10	104	-	-	-
37 (30% a 4m)	1	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	1	4	0	-3,774	-2,522	-2,635
	3	1	4	42	-3,474	-2,198	-2,632
	4	1	6	45,64	-3,707	-3,136	-3,746
	5	1	8	66,59	-8,744	-8,67	-4,134
	6	0,9999	10	126,1	-29,987	-31,185	-3,731
37 (30% a 5m)	1	1	2	0	0,075	-0,075	-1,367
	2	1	4	0	-3,774	-2,522	-2,635
	3	0,9992	5	0	-11,484	-7,943	-3,215
	4	1	5	42	-11,163	-7,595	-3,213
	5	1	6	43,77	-11,21	-8,156	-3,727
	6	1	8	68,05	-16,272	-14,165	-4,034
	7	0,5979	10	89,24	-	-	-
37 (0% a 2m)	1	1	2	0			
	2	1	2	0			
	3	1	4	7,432			
	4	0,9953	6	27,7			
	5	-	8	-			
	6	-	10	-			
37 (0% a 4m)	1	1	2	0			
	2	1	4	0			
	3	1	4	0			
	4	1	6	23,86			
	5	1	8	58,89			
	6	0,7605	10	-			
37 (0% a 5m)	1	1	2	0			
	2	1	4	0			
	3	0,9992	5	0			
	4	1	5	0			
	5	1	6	15,86			
	6	0,9912	8	54,94			
	7	-	10	-			
37 (120% a 2m)	1	1	2	0			
	2	1	2	166			
	3	1	4	167,1			
	4	1	6	168,5			
	5	1	8	169			

	6	1	10	170,8			
37 (120% a 4m)	1	1	2	0			
	2	1	4	0			
	3	1	4	166			
	4	1	6	167,2			
	5	1	8	168,1			
	6	0,9857	10	-			
37 (120% a 5m)	1	1	2	0			
	2	1	4	0			
	3	0,9992	5	0			
	4	1	5	166			
	5	1	6	166,6			
	6	1	8	167,2			
	7	0,8883	10	-			
37 (150% a 2m)	1	1	2	0			
	2	1	2	207			
	3	1	4	207,9			
	4	1	6	209,2			
	5	1	8	209,5			
	6	0,9981	10	203,2			
37 (150% a 4m)	1	1	2	0			
	2	1	4	0			
	3	1	4	207			
	4	1	6	208,1			
	5	1	8	208,6			
	6	0,9309	10	-			
37 (150% a 5m)	1	1	2	0			
	2	1	4	0			
	3	0,9992	5	0			
	4	1	5	207			
	5	1	6	207,5			
	6	1	8	207,7			
	7	0,9992	10	197,8			
37 (200% a 2m)	1	1	2	0			
	2	1	2	276			
	3	1	4	276,6			
	4	1	6	277,6			
	5	1	8	277,7			
	6	0,9641	10	-			
37 (200% a 4m)	1	1	2	0			
	2	1	4	0			
	3	1	4	276			
	4	1	6	276,8			

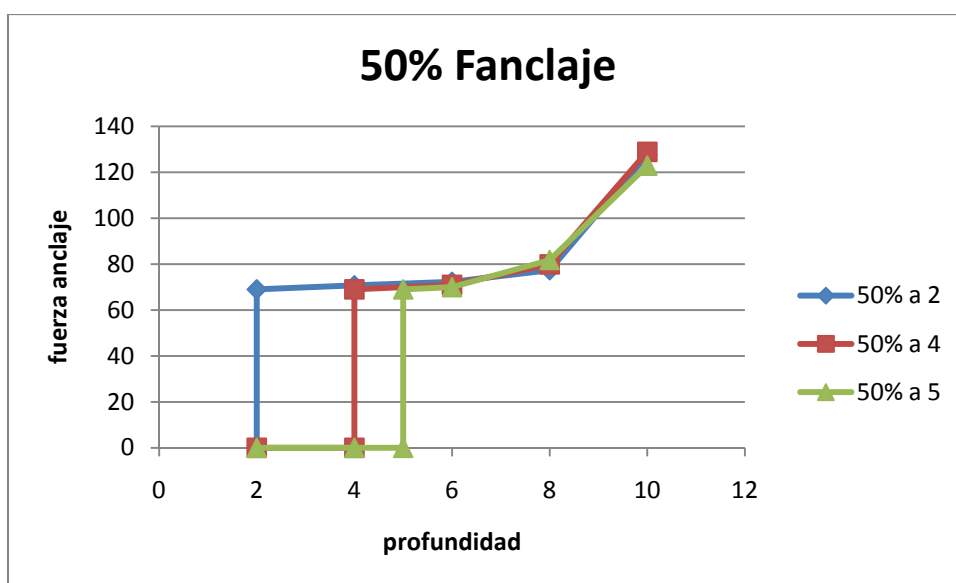
	5	1	8	276,8			
	6	0,9993	10	263			
			11	255,8	añadido xa comprob. Fanc		
37 (200% a 5m)	1	1	2	0			
	2	1	4	0			
	3	0,9992	5	0			
	4	1	5	276			
	5	1	6	276,3			
	6	1	8	276			
	7	0,9493	10	-			
37 (300% a 2m)	1	1	2	0			
	2	1	2	414			
	3	1	4	413,8			
	4	1	6	414,5			
	5	1	8	414,2			
	6	1	10	396,7			



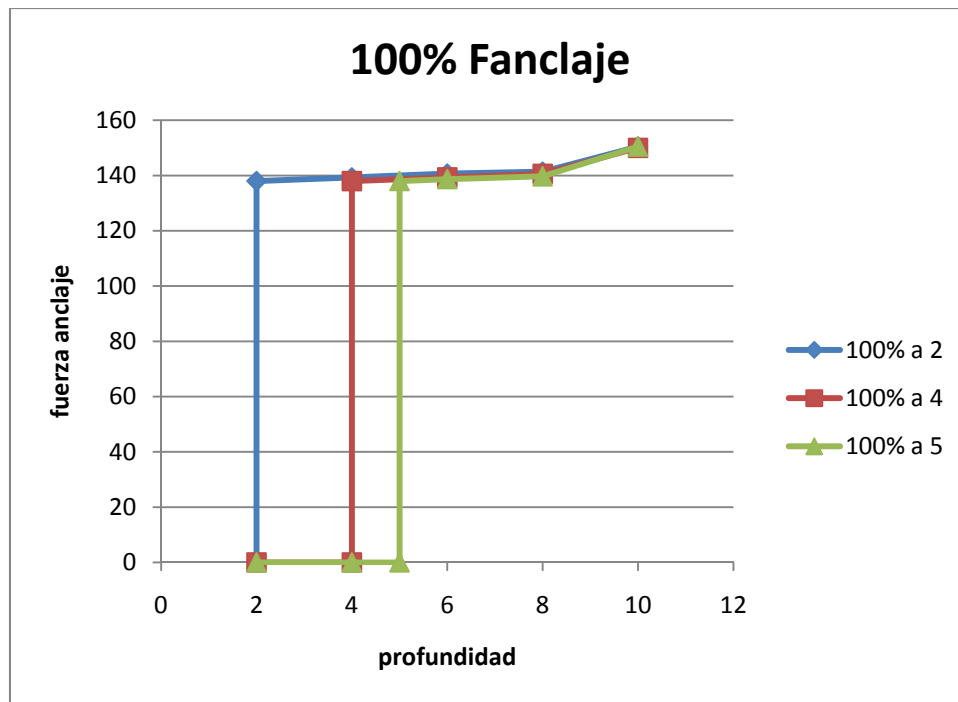
Evolución de la fuerza de anclaje con la excavación al aplicar el 0% a 2 m de la cabeza de pantalla al excavar 2, 4 y 5 m



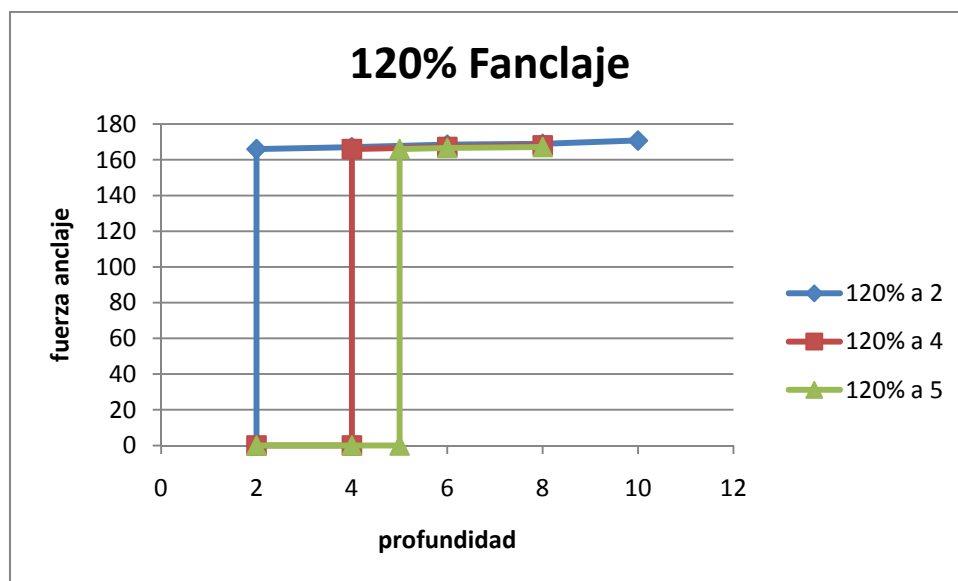
Evolución de la fuerza de anclaje con la excavación al aplicar el 30% a 2 m de la cabeza de pantalla al excavar 2, 4 y 5 m



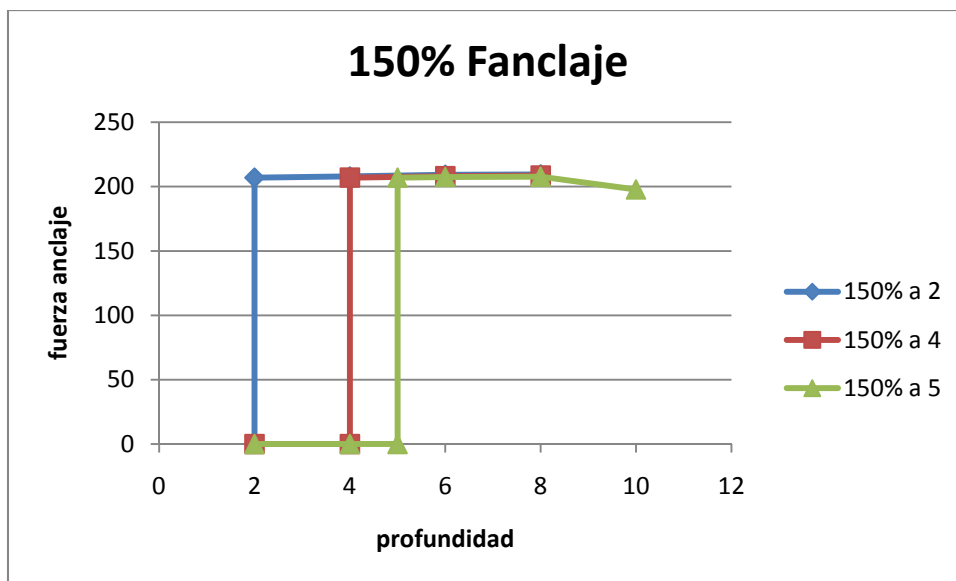
Evolución de la fuerza de anclaje con la excavación al aplicar el 50% a 2 m de la cabeza de pantalla al excavar 2, 4 y 5 m



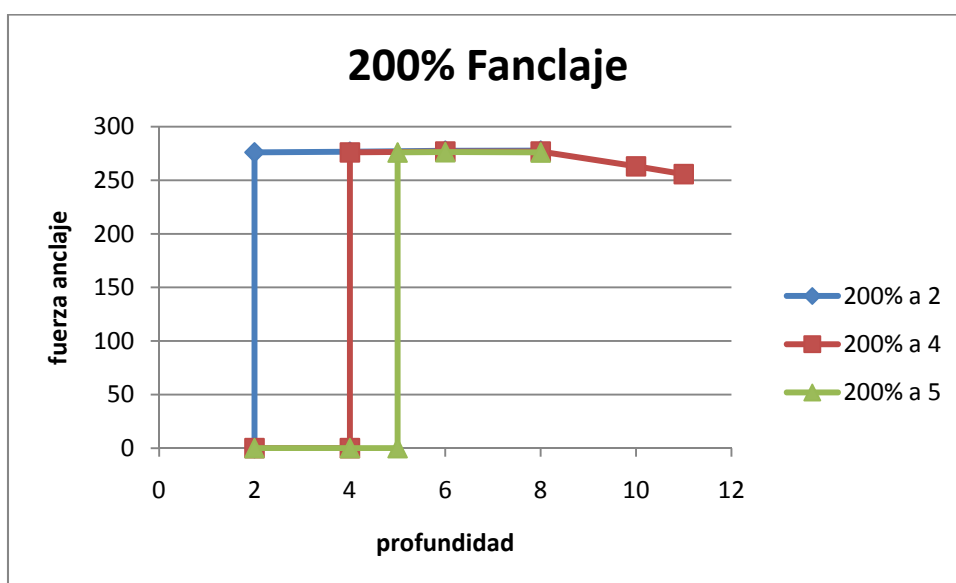
Evolución de la fuerza de anclaje con la excavación al aplicar el 100% a 2 m de la cabeza de pantalla al excavar 2, 4 y 5 m



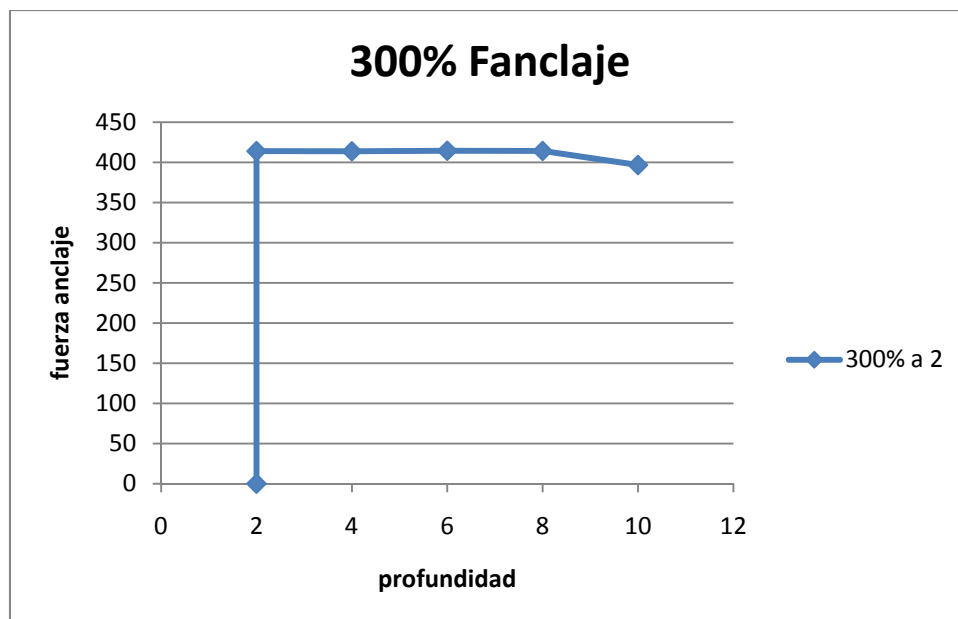
Evolución de la fuerza de anclaje con la excavación al aplicar el 120% a 2 m de la cabeza de pantalla al excavar 2, 4 y 5 m



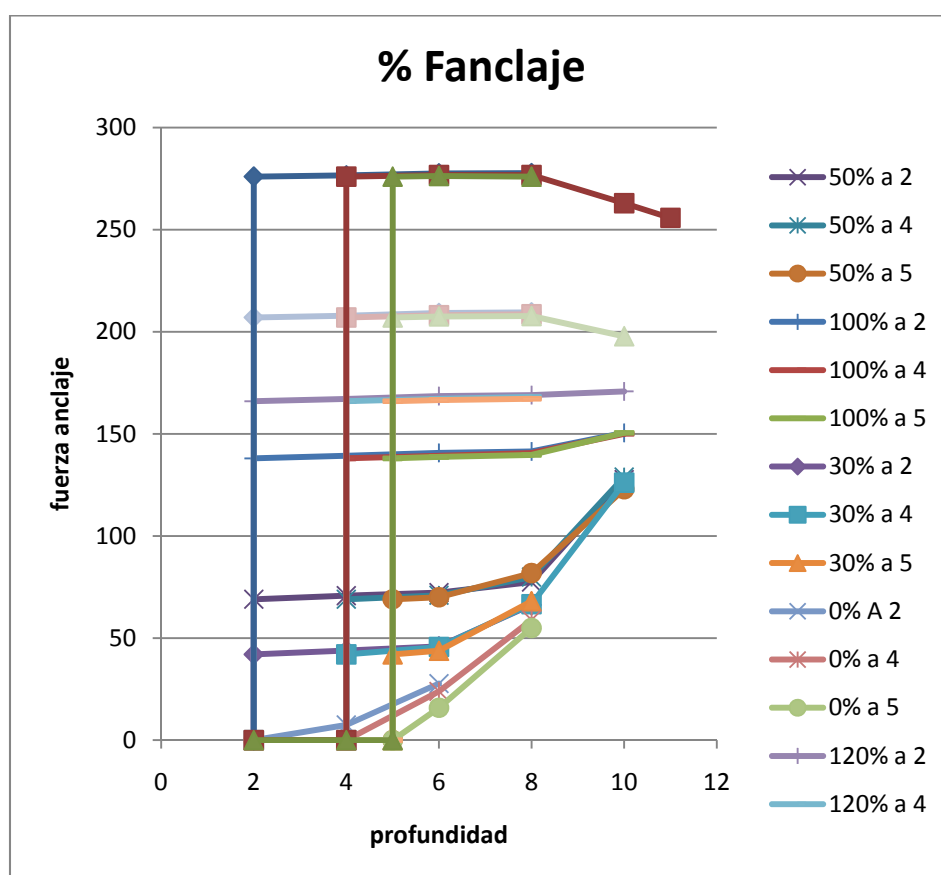
Evolución de la fuerza de anclaje con la excavación al aplicar el 150% a 2 m de la cabeza de pantalla al excavar 2, 4 y 5 m



Evolución de la fuerza de anclaje con la excavación al aplicar el 200% a 2 m de la cabeza de pantalla al excavar 2, 4 y 5 m



Evolución de la fuerza de anclaje con la excavación al aplicar el 300% a 2 m de la cabeza de pantalla al excavar 2 m



Evolución de distintas fuerzas de anclaje aplicadas a diferentes profundidades de excavación

ANEJO III: DIMENSIONAMIENTO DEL ANCLAJE

PANTALLAS ANCLADAS A 1 NIVEL - dimensionamiento del anclaje

DATOS GENERALES			
Datos pantalla:		Datos suelo:	
h (m)	10,00	ϕ (grados)	38,68
l (m)	2,00	c' (Cu) (Mpa)	0,00
d (m)	2,50	γ (KN/m3)	20,00
α (grados)	15,00		

Coord. Cabeza Plla. (m):	
x	y
50	35
Coord. pie pantalla (m):	
x	y
50	22,50

Parámetros geotécnicos:	
β (ang. Cuña rot. En pie de pantalla respecto vertical) (grados)	25,66
τ bulbo-terreno (Mpa)	0,07
σ' pto. Medio bulbo (KN/m2)	85,00
Coef. Minoración $\tan \phi$	1,00
Coef. Minoración c'	1,00

TENDONES	
σ elas (Mpa)	1.700,00
σ rot (Mpa)	1.800,00
E (N/mm2)	195.000,00
Tnom (carga trabajo) (KN/m)	138,00
LS (dist. Anc)(m)	2,00
AS (secc. Tendón) (mm2)	299,00
r tendón (mm)	9,76

BULBO	
Dp (diám. Perforac.)(mm)	130,00
Db(diám. Bulbo) (mm)	150,00
Lb (long. Bulbo) (m)	12,91
Obs.	OK

GEOMETRÍA ANCLAJE PLAXIS			
Long. Libre	6,15	Long. Geotex.	12,91
Coords. Extremo anc.		Coords. Extremo geotextil	
x	y	x	y
55,94	31,41	68,41	28,07

INTRODUCIR EN PLAXIS			
TIRANTE		BULBO	
EA (KN)	5,8E+04	EA (KN/m)	29152,50000

La norma establece long. Mín. de bulbo de 4m y menor a 15m.

Según carreteras, todo lo que pase de long. Bulbo mayor a 14m se multiplicará por 0,7 para tener en cuenta en la comprobación la rotura progresiva del bulbo.

La resist. Al deslizamiento debe obtenerse mediante ensayos según normativa.

Carreteras dice que para obtener resist. Al deslizamiento, primero ensayos, sino mohr y sino valor aproximado según gráficas.

El diámetro de perforación debe ser 20mm superior a la vaina. Según el caso, el diámetro del bulbo se aumenta con la presión.

La long. Libre debe ser de cómo mínimo 5m. Si no se deben utilizar métodos especiales de tesado.

He obviado la resistencia al deslizamiento entre acero y bulbo.

Aunque en Plaxis introduzco $C'=0$, para dim. Anclaje coloco un valor de 0,02.